



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

ŽÍHÁNÍ KE SNÍŽENÍ VNITŘNÍHO PNUTÍ SVAŘENCŮ S OTĚRUVZDORNÝMI PLECHY

STRESS-FREE ANNEALING OF WELDMENTS WITH WEAR RESISTANT PLATES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Hřebíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Němec, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Pavel Hřebíček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Karel Němec, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Žihání ke snížení vnitřního pnutí svařenců s otěruvzdornými plechy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je stanovení podmínek žihání ke snížení vnitřního pnutí svařenců s otěruvzdornými plechy Hardox 450, Hardox 500, Creusabro 4800, Rukki atd. V rámci literární rešerše bude proveden popis vlivu svařování a následného žihání na strukturu a mechanické vlastnosti daných materiálů.

Cíle bakalářské práce:

- charakteristika otěruvzdorných plechů Hardox 450, Hardox 500, Creusabro 4800 a Rukki
- popis vlivu svařování na strukturu a mechanické vlastnosti materiálů
- stanovení podmínek žihání ke snížení vnitřního pnutí svařenců
- shrnutí a diskuze získaných poznatků

Seznam doporučené literatury:

- Fremunt, P. a T. Podrábský. Konstrukční oceli. 1. vyd. Brno: CERM, 1996, 261 s. ISBN 8085867958.
- Macek, K., P. Zuna a J. Janovec. Tepelné úpravy kovových materiálů. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1993, 84 s. ISBN 80-01-01002-3.
- Thelning, Karl-Erik. Steel and its heat treatment. Butterworth-Heinemann, 2013.
- Ptáček, L. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd., Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- Jech, J. Teplné zpracování oceli: metalografická příručka. 4. vyd. přeprac. a dopln. Praha: SNTL, 1983, 391 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá tepelným zpracováním svařenců z otěruvzdorných plechů. Svařování i tepelné zpracování ovlivňují materiál, což může nepříznivě ovlivnit charakteristiky těchto plechů, zvláště pak jejich otěruvzdornost. Cílem je nastínit možnosti těchto zpracování.

ABSTRACT

This thesis deals with welded heat treatment of wear resistant plates. Welding and heat treatment influence material, which may adversely affect the characteristics of these plates, especially their resistance to abrasion. The aim is to outline the possibilities of such processing.

Klíčová slova

svařování, tepelné zpracování, otěruvzdorné plechy, odolnost proti abrazivnímu opotřebení, mechanické vlastnosti

Key words

welding, heat treatment, wear resistant plates, resistance to abrasion, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

HŘEBÍČEK, P. *Žíhání ke snížení vnitřního pnutí svařenců s otěruvzdornými plechy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za vedení práce, věcné připomínky a rady týkající se zpracování této práce. Dále děkuji panu Ing. Michaelu Formánkovi a paní Ing. Ivaně Žídkové za cenné informace a rady týkající se obsahu práce. Děkuji také svým rodičům za trpělivost a podporu při mém studiu na vysoké škole.

OBSAH

Úvod	1
1. Svařování.....	2
1.1 Metody svařování	2
1.1.1 Rozdělení metod svařování	3
1.1.2 Tavné svařování.....	4
2. Tepelné zpracování	10
2.1 IRA a ARA diagramy	12
2.1.1 IRA diagram	12
2.1.2 ARA diagram.....	13
2.2 Druhy tepelného zpracování	13
2.2.1 Žihání.....	13
2.2.2 Kalení	16
2.2.3 Popouštění	18
3. Otěruvzdorné oceli	20
3.1 Nelegované oceli.....	21
3.2 Nízkolegované oceli	21
3.3 Střednělegované oceli	22
3.4 Austenitické manganové oceli	23
3.4.1 Legování austenitických manganových ocelí.....	23
3.4.2 Tepelné zpracování austenitických manganových ocelí	24
3.4.3 Vliv velikosti zrna na odolnost proti opotřebení	25
3.4.4 Perlitizace	25
3.4.5 Mechanické vlastnosti austenitických manganových ocelí	26
3.4.6 Zpevnění pracovního povrchu austenitických manganových ocelí.....	27
4. Vybrané otěruvzdorné plechy a jejich vlastnosti	28
4.1 Hardox 450	28

4.1.1	Vlastnosti a chemické složení	28
4.1.2	Svařitelnost, možnost tepelného zpracování	28
4.1.3	Využití	30
4.2	Hardox 500	31
4.2.1	Vlastnosti a chemické složení	31
4.2.2	Svařitelnost, možnost tepelného zpracování	31
4.2.3	Využití	33
4.3	Creusabro 4800	33
4.3.1	Vlastnosti a chemické složení	33
4.3.2	Svařitelnost, možnost tepelného zpracování	34
4.3.3	Využití	35
4.4	Ruukki Raex	35
4.4.1	Vlastnosti a chemické složení	35
4.4.2	Svařitelnost, možnost tepelného zpracování	36
4.4.3	Využití	37
5.	Závěr.....	38
	Seznam použitých zdrojů.....	39

Úvod

Cílem této práce je stanovení podmínek žíhání ke snížení vnitřního pnutí svařenců s otěruvzdornými plechy Hardox 450, Hardox 500, Creusabro 4800 a Ruukki.

První kapitola podrobněji popisuje metodu svařování. Nejprve zde jsou vyjmenovány jednotlivé druhy svařování, s následným popisem metod tavného svařování. Tavné svařování je stále nejrozšířenější metodou, proto mu bude v této práci věnována největší pozornost.

Druhá kapitola se zaměřuje na tepelné zpracování. Strukturní přeměny ocelí při tepelném zpracování se zachycují v IRA a ARA diagramech, proto je jejich smysl nastíněn také v této kapitole. Dalším bodem této kapitoly jsou jednotlivé druhy tepelného zpracování. Budou zde popsány charakteristické teploty, prodlevy na teplotách a strukturní přeměny při jednotlivých druzích tepelného zpracování.

V následující kapitole je naznačena problematika otěruvzdorných plechů. Otěruvzdornost je schopnost oceli odolávat proti abrazivnímu opotřebení, čehož lze dosáhnout různými způsoby, které jsou voleny podle množství legujících prvků v materiálu. Jednotlivé postupy získání otěruvzdornosti jsou zde popsány pro nelegované, nízkolegované, střednělegované a vysocelegované austenitické manganové oceli. V této části je věnována větší pozornost austenitickým manganovým ocelím, protože je u nich otěruvzdornost závislá na více faktorech.

Poslední kapitola je věnována popisu jednotlivých značek otěruvzdorných ocelí, jako jsou Hardox 450, Hardox 500, Creusabro 4800 a Ruukki. U každých ocelí lze najít charakteristické vlastnosti, mezi které patří tvrdost, mez kluzu a mez pevnosti, tažnost a nárazová práce. Problémem zůstává tepelné ovlivnění materiálu jak při svařování, tak při tepelném zpracování, kdy se mohou měnit vlastnosti (zvláště pak u těchto ocelí důležitá tvrdost) těchto materiálů. Posledním bodem této kapitoly je využití těchto ocelí.

1. Svařování

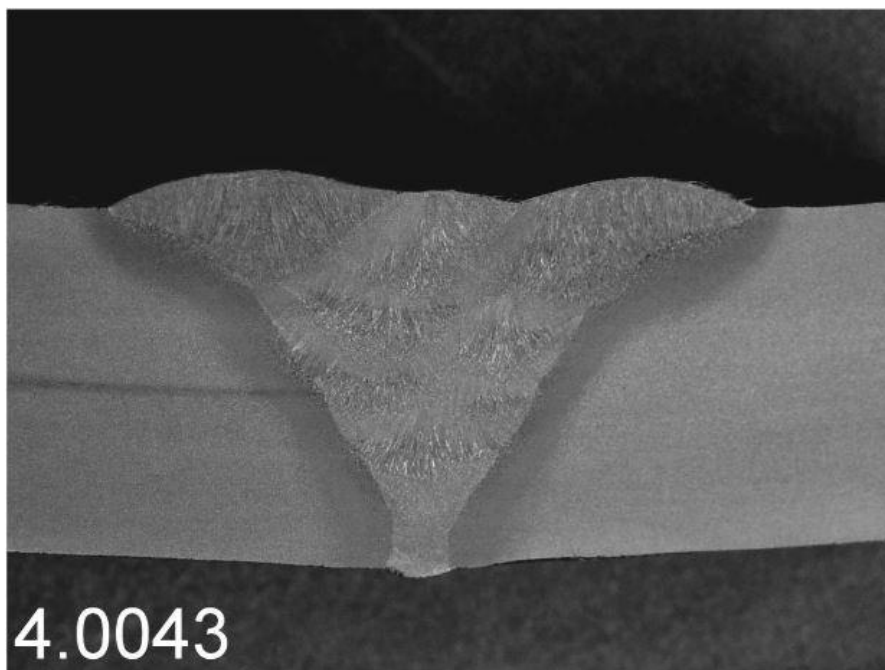
Svařování je definováno jako nerozebíratelné spojení dvou kovů, a to za působení mechanické, tepelné nebo radiační energie. Ke spoji dochází působením meziatomových sil a adhezních vazeb na aktivovaných plochách spojovaného materiálu. Aktivaci ploch lze provést působením několika forem aktivační energie:

- Termická aktivace
- Mechanická aktivace (pružné a elastické deformace)
- Radiační aktivace (elektronové, fotonové nebo iontové ozáření) [1].

1.1 Metody svařování

Metody svařování lze dělit na dvě skupiny – tavné a tlakové svařování. Tavné svařování spočívá v přivedení energie do svaru, kde dochází k natavení základního, popřípadě přídavného materiálu. Natavený kov je ke své tuhé fázi vázán adhezními silami, které se při postupném tuhnutí mění v chemickou vazbu. Zaniká tak rozhraní tavenina – tuhá fáze a dochází k nukleaci a růstu zrn. Nová zrna rostou proti směru odvodu tepla a kolmo na izotermy. Tlakové svařování je založeno na působení mechanické energie. Aktivací povrchových atomů a makro nebo mikro deformací se přiblíží spojované povrchy na vzdálenost působení meziatomových sil, přičemž vznikne vlastní spoj. U obou způsobů svařování je nutno na rozhraní sváru překonat určitou bariéru potenciální energie, aby došlo ke vzniku spoje [2].

Obrázek 1: Svarový spoj vytvořený tavným svařováním [1].



Tavnými metodami svařování kolem roztavené části vzniká pásmo svarového kovu, kde teplota dosahuje překrystalizačních hodnot. Probíhá zde alespoň částečná překrystalizace a toto pásmo nazýváme tepelně ovlivněná oblast (viz Obrázek 1).

Mezi hlavní výhody svařování patří vysoká pevnost svarového spoje, těsnost a trvanlivost. Oproti odlévání má až 50% úsporu materiálu při výrobě konstrukcí. Svařováním lze v kusové a malosériové výrobě efektivně a rychle realizovat konstrukční návrhy. Zastává také nezastupitelné místo v otázkách opravárenství.

Hlavní nevýhodou je nerozebíratelnost spoje. Při svařování také dochází k tepelnému ovlivnění materiálu v blízkém okolí sváru. To má za důsledek částečnou změnu struktury a vlastností tohoto místa a vznik vnitřního pnutí, které se musí snížit následným tepelným zpracováním. K výrobě svarového spoje je potřeba kvalifikovaného personálu.

Svařování se používá jak při realizaci nových konstrukčních celků a strojů (od ocelových konstrukcí, mostů, dopravních prostředků, kotlů, turbín, až po jaderné reaktory a tlakové svary), tak při opravách (vyvařování vnitřních dutin, nebo opravy funkčních ploch, navařování kluzných materiálů apod.) [3].

1.1.1 Rozdělení metod svařování [2]

A) Metody tavného svařování (0)

1. Svařování elektrickým obloukem (1)
 - a) Obloukové svařování tavící se elektrodou (101)
 - b) Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (111)
 - c) Gravitační obloukové svařování obalenou elektrodou (112)
 - d) Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu (114)
 - e) Vibrační svařování a navařování
 - f) Pod tavidlem (12)
 - g) Obloukové svařování v ochranné atmosféře (13)
 - h) Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu-MIG (131)
 - i) Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu-MAG(135)
 - j) Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu (136)
 - k) Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu (137)
 - l) Obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu-WIG (141)
2. Elektrostruskové svařování (72)
3. Svařování plazmové (15)
4. Svařování plazmové MIG svařování (151)
5. Svařování magneticky ovládaným obloukem (185)
6. Elektronové svařování (76)
7. Plamenové svařování (3)
 - a) kyslíko-acetylenové svařování (311)
 - b) kyslíko-vodíkové svařování (313)
8. Svařování slévárenské
9. Svařování světelným zářením (75)
10. Laserové svařování (751)
11. Aluminotermické svařování (71)
12. Elektroplynové svařování (73)
13. Indukční svařování (74)

B) Metody tlakového svařování (4)

1. Tlakové svařování za studena (48)
2. Odporové svařování (2)
 - a) stykové
 - α) stlačovací stykové svařování (25)
 - β) odtavovací stykové svařování (24)
 - b) přeplátováním
 - α) bodové odporové svařování (21)
 - β) švové odporové svařování (22)
 - γ) rozválcovací švové svařování (222)
 - δ) výstupkové (23)
 - ϵ) vysokofrekvenční odporové svařování (291)
3. Svařování indukční (74)
4. Svařování v ohni
 - a) kovářské svařování (43)
 - b) tlakové svařování s plamenovým ohřevem (47)
5. Třecí svařování (42)
6. Ultrazvukové svařování (41)
7. Výbuchové svařování (44)

1.1.2 Tavné svařování

1) Svařování elektrickým obloukem

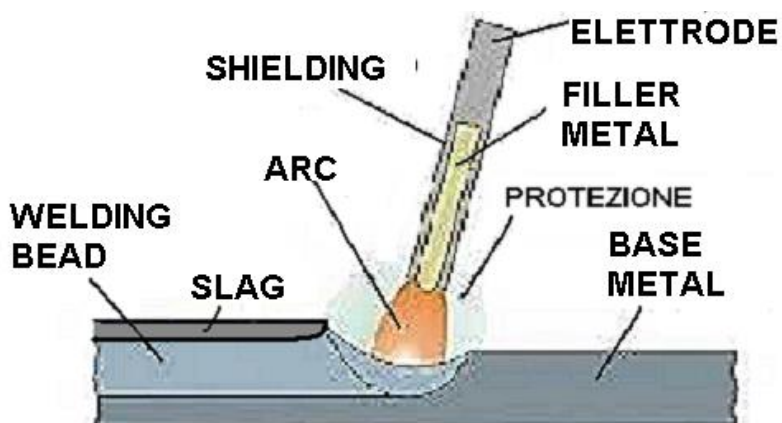
Při svařování elektrickým obloukem je zdrojem tepla elektrický oblouk, který vzniká v prostředí ionizovaného plynu mezi elektrodou a svařovaným materiálem. Dodaným teplem dochází k natavení spojovaného materiálu a následnému spojení. Malý anodový úbytek napětí, malý potenciální rozdíl na elektrodách, velká proudová hustota katodové skvrny, intenzivní vyzařování světelného a UV záření a proud v řádu jednotek až tisíců ampér jsou základními charakteristikami elektrického oblouku. Jako zdroj se používají točivé svařovací agregáty (pro stejnosměrný proud) nebo svařovací transformátory (pro střídavý proud).

Ke svařování elektrickým obloukem se používají **ruční elektrody**, které mohou být buď obalené, nebo holé. Obal slouží ke stabilizaci kovu, zpomalení chladnutí vytvořením strusky, ochraně svarového kovu před účinky atmosféry a přidání legujících prvků do místa svaru. Obaly jsou kyselé, bazické, organické, rutilové a kombinace těchto jmenovaných [3], [4].

Další metodou je svařování netavicí se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře – metoda **WIG (TIG)**. Při této metodě je zdrojem tepla elektrický oblouk, který vzniká mezi svařovaným materiálem a wolframovou elektrodou. Teplem dochází k natavení svařovaného materiálu a vzniká tak spoj. Elektroda v tomto případě neslouží jako přídavný materiál. K tomu slouží tzv. přídavný „studený drát“. Ten se do místa svaru dopravuje buď ručně, nebo mechanicky. Tavicí oblouk je chráněn ochrannou atmosférou inertního plynu, který zabraňuje vniknutí nečistot do svarové lázně. Mezi hlavní výhody metody WIG patří účinná ochrana svarové lázně inertním plynem, koncentrovaný paprsek, svařování v místech s menší dostupností a svařování s přídavným materiálem i bez něj. Svarový spoj se také nemusí dodatečně upravovat, protože se netvoří struska ani kuličky [4], [5].

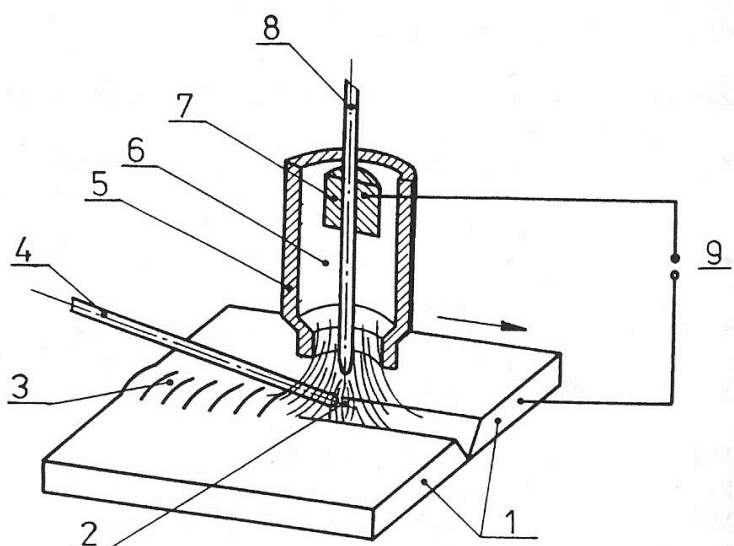
Neméně významnou metodou je svařování tavicí se elektrodou v ochranném plynu – metody **MIG/MAG**. Tato metoda je založena na vzniku elektrického oblouku v ochranném plynu mezi kontinuálně dodávanou tavicí se elektrodou, která slouží jednak jako zdroj elektrického oblouku, tak i jako přídavný materiál (drát). Napájení drátu je zajištěno tak, aby elektricky vodivá délka drátu byla co nejkratší (od ústí hubice na špičku drátu). Tato metoda je vedle svařování ruční elektrodou nejrozšířenější metodou svařování, a to kvůli širokému spektru ochranných plynů a přídavných materiálů. Lze také snadno robotizovat [4], [5].

Obrázek 2: Princip svařování ruční obalenou elektrodou [4].



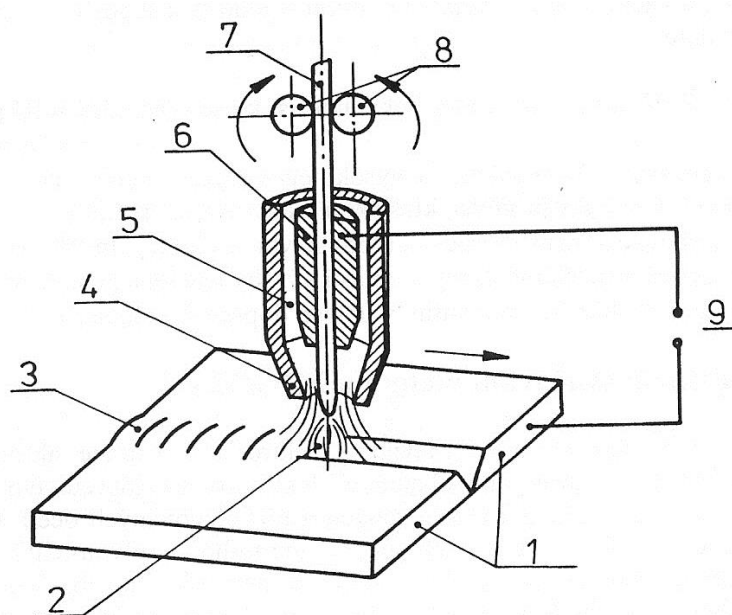
Welding bead .. svarový kov, slag .. struska, arc .. svarový oblouk, shielding .. obal, elettrode .. elektroda, filler metal .. přídavný materiál, protezione .. ochranný plyn, base metal .. základní materiál

Obrázek 3: Princip svařování metodou WIG (TIG) [4].



1 .. svařovaný materiál, 2 .. elektrický oblouk, 3 .. svar, 4 .. přídavný materiál, 5 .. plynová trubice, 6 .. ochranný plyn, 7 .. kontaktní kleštiny, 8 .. wolframová elektroda, 9 .. zdroj proudu

Obrázek 4: Princip svařování metodou MIG/MAG [4].

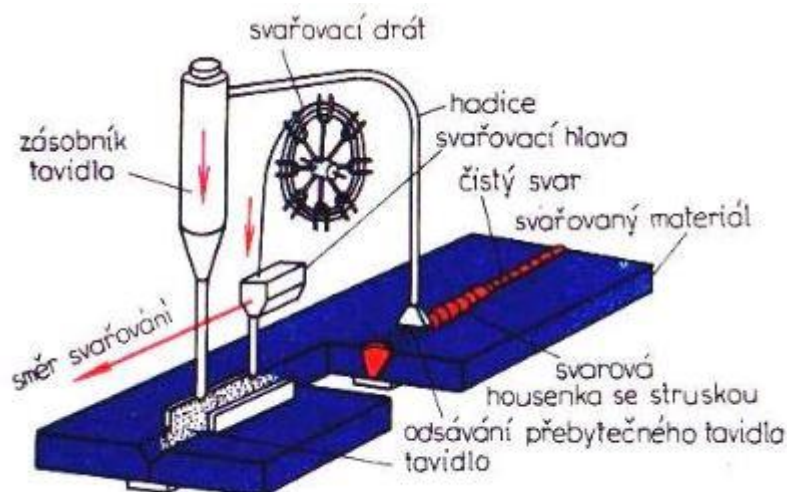


1 .. svařovaný materiál, 2 .. elektrický oblouk, 3 .. svar, 4 .. plynová trubice, 5 .. ochranný plyn, 6 .. kontaktní průvlak, 7 .. přídavný drát, 8 .. podávací kladky, 9 .. zdroj proudu

2) Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem

Principem svařování elektrickým obloukem pod tavidlem je hoření oblouku pod vrstvou sypkého tavidla. Teplem oblouku se roztaví elektrický drát, základní materiál a část tavidla v kaverně, která vznikne ve vrstvě tavidla a je naplněna parami kovu a strusky. Touto metodou lze dosáhnout velmi čistého svarového kovu s dobrými mechanickými vlastnostmi, navíc je až 5x produktivnější než svařování ruční elektrodou, lze snadno automatizovat a svařovací oblouk nezařahuje okolí. Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem se uplatňuje pro svařování plechů od tloušťky 3mm, od tloušťky 50mm lze svařovat do úzkého úkosu (úhel rozevření 0-8°). Používá se při svařování tlustostěnných tlakových nádob, rotorů turbín, lodí, mostních konstrukcí atd. [4].

Obrázek 5: Svařování pod tavidlem [4].

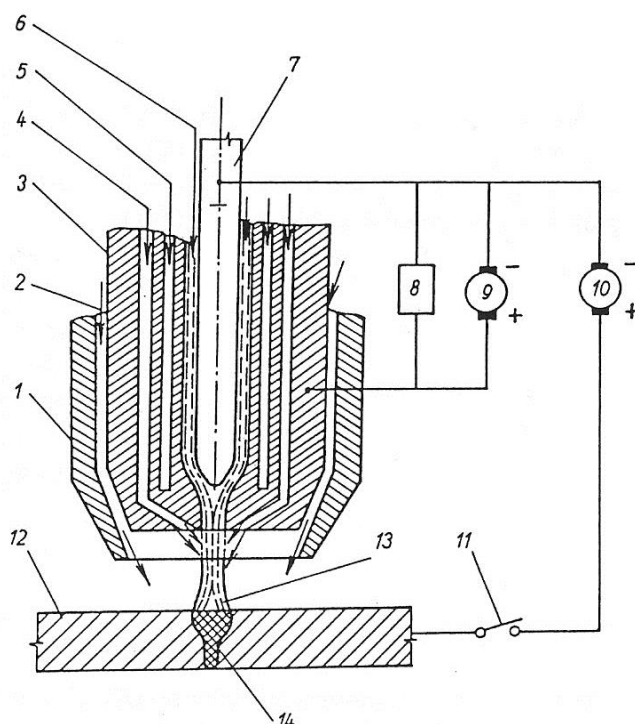


3) Svařování plazmou

Princip svařování plazmou je založen na ionizaci plynu, při které dochází k uvolnění valenčních elektronů jednotlivých atomů ze svých orbitů. Uvolněné elektrony tak vedou elektrický proud. Chemicky stejnorodý plyn je tak rozložen na směs atomů, iontů, elektronů atd. Tato směs kladných a záporných částic v plazmě má přibližně stejný počet, proto působí neutrálně. Říkáme tedy o ní, že je kvazineutrální. K ionizaci plynu je třeba použití značného množství energie, k čemuž v technické praxi slouží elektrický oblouk.

Vlastní princip této metody je odvozen od metody WIG. Keramická hubice je nahrazena kovovou tryskou s vnitřním chlazením. Hořák má zúženou výstupní trysku, která zajišťuje kontrakci paprsku. Tuto kontrakci také podporují fokusační plyny, jako například směsi argonu s vodíkem nebo dusíkem. Ohřev plynu elektrickým obloukem mnohonásobně zvyšuje jeho objem. Tím je zaručena vysoká rychlost výstupní plazmy tryskou, což umožňuje proniknutí paprsku celým průřezem materiálu. Výstupní rychlost plazmy se pohybuje v rozmezí $200 \text{ až } 500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [2].

Obrázek 6: Princip plazmového hořáku [4].

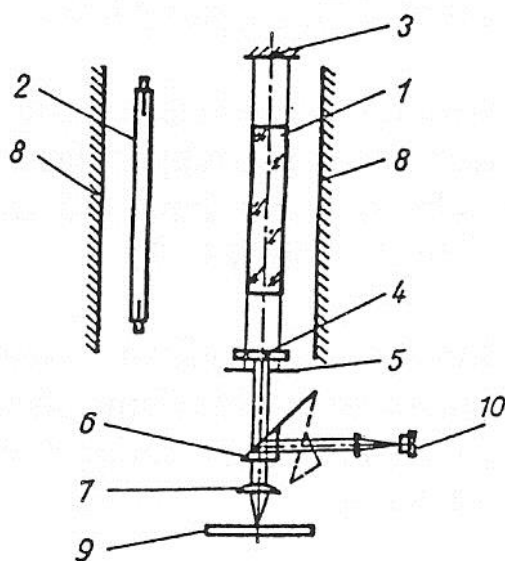


1 .. hubice pro přívod ochranného plynu, 2 .. ochranný plyn, 3 .. tryska hořáku, 4 .. fokusační plyn, 5 .. vodní chlazení, 6 .. plazmový plyn, 7 .. wolframová elektroda, 8 .. vysokofrekvenční a vysokonapěťový ionizátor, 9 .. zdroj pomocného oblouku, 10 .. zdroj hlavního elektrického oblouku, 11 .. spínač, 12 .. základní svařovaný materiál, 13 .. plazmový paprsek, 14 .. provedený svar

4) Svařování laserem

Principem laserového svařování je zesílení světla stimulovanou emisí záření. To lze realizovat několika způsoby, a to buď pevnou látkou, nebo plynem. U **pevnolátkových laserů** je rubínový krystal dopovaný trojmocnými ionty chrómu, které jsou zachyceny v mřížce oxidu hlinitého. Rubín je ozařován bílým světlem výbojky a absorbuje zelenou a modrou složku světla. Zde dochází ke stimulaci emise záření, které je dále zesilováno průchody rezonátorem, který je tvořen zrcadly se vzájemnou vzdáleností rovnou násobku vlnové délky emitovaného záření. Zrcadlo se 100% odrazivostí vrací všechny fotony do aktivního prostředí, druhé zrcadlo s 80 až 90% odrazivostí propustí část záření ve formě vysokoenergetického pulsu, které se opakují [2].

Obrázek 7: Schéma pevnolátkového laseru [4.]

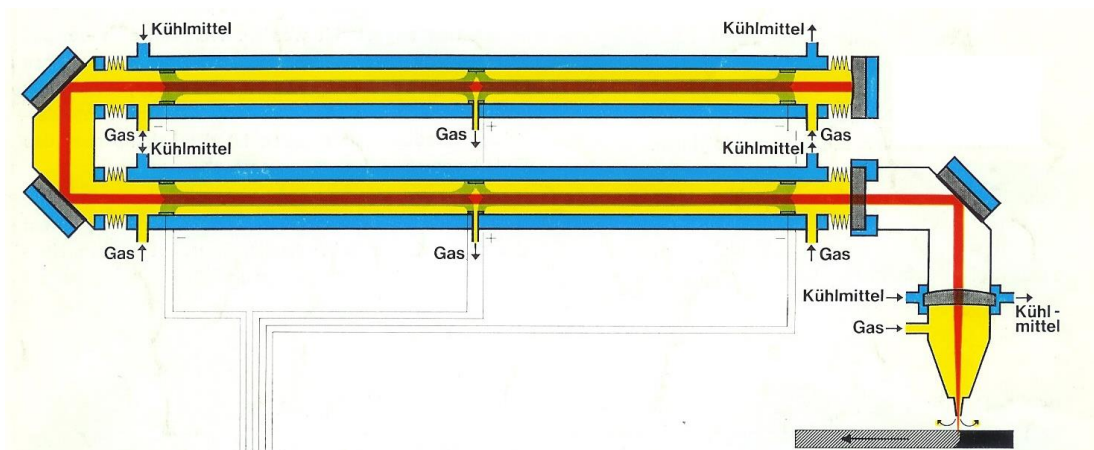


1 .. aktivní prostředí (rubín), 2 .. výbojka, 3 .. zrcadlo se 100% odrazivostí, 4 .. zrcadlo s 80 – 90% odrazivostí, 5 .. clona, 6 .. optický hranol, 7 .. zaostřovací optika, 8 .. eliptická reflexní dutina, 9 .. svařovaný materiál, 10 .. pozorovací optika

Plynový CO₂ laser má aktivní prostředí tvořené směsí plynů helia, dusíku a oxidu uhličitého. Proces zesílení začíná vybuzením molekuly dusíku na nejvyšší vibrační hladinu. Tím je způsoben přenos rezonanční energie a vybuzení CO₂ do základní energetické hladiny, při čemž dochází ke stimulované emisi záření. Aby byl zajištěn přechod CO₂ do základní energetické hladiny, používá se helium, které odebírá tomuto plynu budicí energii. Díky vysoké tepelné vodivosti také ochlazuje aktivní prostředí laseru. Tyto lasery mohou pracovat v kontinuálním i v pulsním režimu [2].

Mezi výhody svařování laserem patří adaptabilita s rychlou změnou technologie, čistota provozu, vysoká přesnost ovlivněné oblasti laserem, tichý chod, snadná automatizace, svařování tloušťek plechů od několika mikrometrů, atd. [2].

Obrázek 8: Schéma plynového laseru [4].



Kühlmittel .. chladicí kapalina, Gas .. plyn

5) Plamenové svařování

Při plamenovém svařování je zdrojem tepla chemická reakce, která vzniká hořením okysličujícího a hořlavého plynu. Parametry plamene se řídí použitými plyny. Mezi hlavní zastupitele hořlavých plynů patří acetylen, vodík, propan, metylacetylenpropadien, etylen, propylen a zemní plyn. Teplota plamene může dosahovat teplot až 3150°C.

Plamenové svařování je jedním z nejstarších a nejpoužívanějších typů svařování. Ač je to velmi zastaralý způsob, je stále používán při různých řemeslných pracích, jako je topenářství, klempířství nebo autoopravárenství. Bez dodávání přídatného materiálu lze používat i pro řezání. Často se také používá při navařování tvrdých návarů, nebo při svařování plechů do tloušťky 4 mm [3], [4].

6) Aluminotermické svařování

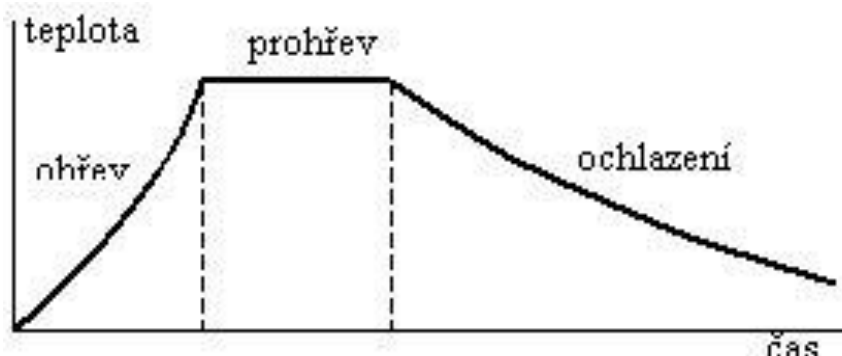
Při aluminotermickém svařování se využívá jako zdroj tepla exotermická reakce, při které dochází k redukci železa hliníkem. Získáváme tak vysoce přehřátý kov, který slouží jako zdroj tepla a zároveň i jako přídatný materiál. Aluminotermická dávka pro svařování musí obsahovat oxidy kovů přídatného materiálu, oxidy hliníku a legující přísady. Výťažnost dávky v případě oceli je 50 % oceli a 50 % strusky. Teploty vyredukovaného kovu dosahují hodnot 2100 až 2200°C.

Aluminotermické svařování se s výhodou používá při svařování betonářských výztuží, svařování spojů měď – měď, měď – ocel, bronz – ocel, při renovacích hřidelů s velkým opotřebením a průřezem a při svařování kolejnic. Při tomto druhu svařování je nutné mít formu z vhodné formovací směsi, aby nemohl roztavený kov vytéci z místa svaru [3], [4].

2. Tepelné zpracování

Tepelným zpracováním se rozumí řízené využívání fázových a strukturních přeměn v tuhém stavu s cílem získat požadované mechanické, technologické či jiné užité vlastnosti výrobků nebo polotovarů ([6], s. 82). Typickým procesem tepelného zpracování je ohřev materiálu na určitou teplotu, výdrž na této teplotě a následné ochlazování. Délka ohřevu, prodlevy a ochlazování, stejně jako maximální dosažená teplota se liší v závislosti na konkrétním druhu tepelného zpracování. V drtivé většině případů se k ohřevu součástí používají pece, v nichž se pracuje buď se vzdušnou atmosférou, s ochrannou atmosférou (zde se používají inertní směsi CO, CH₄, CO₂ atd., z inertních plynů jsou typické N a Ar) nebo s vakuem. Existuje několik druhů tepelného zpracování, které závisí na postupu procesu. Využití řízených změn teploty (ohřev, následná výdrž na teplotě a ochlazování) se označuje jako vlastní tepelné zpracování (TZ), změny chemického složení povrchových vrstev a změn teploty (ohřev, následná výdrž na teplotě v atmosféře nasycené určitým prvkem, postupné ochlazování) se nazývá chemicko-tepelné zpracování (CHTZ) a v poslední řadě změny teploty a důsledky plastické deformace (ohřev na určitou teplotu, tváření a následné ochlazování) se označují jako tepelně-mechanické zpracování (TMZ) [6], [7].

Obrázek 9: Průběh tepelného zpracování [7].



Dále lze tepelné zpracování rozdělit na jednotlivé způsoby. Cílem žíhání je dosažení rovnovážné struktury, kdežto u kalení vzniká silně nerovnovážný stav. Tento stav vzniká v důsledku martenzitické nebo bainitické přeměny. Stupeň nerovnovážnosti zakaleného stavu jsme schopni snížit popouštěním.

Tabulka 1: Přehled tepelného zpracování [6].

TZ	žihání	bez překrystalizace	<ul style="list-style-type: none"> – na snížení pnutí – rekrystalizační – na měkko – protivločkové – rozpouštěcí – na odstranění křehkosti po moření
		s překrystalizací	<ul style="list-style-type: none"> – homogenizační – normalizační – izotermické – kombinované
	kalení	martenzitické	<ul style="list-style-type: none"> – do studené lázně (přímé, lomené, přerušované) – do teplé lázně (termální) – se zmrazováním – povrchové kalení
		bainitické	<ul style="list-style-type: none"> – do studené lázně – do teplé lázně (izotermické zušlechťování)
	popouštění	při nízkých teplotách při vysokých teplotách	<ul style="list-style-type: none"> – napouštění – (anizotermické) zušlechťování
CHTZ	vytvoření tvrdých povrchových vrstev	sycení povrchu nekovy	<ul style="list-style-type: none"> – cementování – nitridování – nitrocementování – karbonitridování
TMZ	využití účinků plastické deformace a fázové přeměny	deformace před fázovou přeměnou deformace během izotermické fázové přeměny	deformace austenitu před martenzitickou přeměnou (nízkoteplotní – NTMZ, vysokoteplotní – VTMZ) deformace během perlitické, popř. bainitické přeměny

2.1 IRA a ARA diagramy

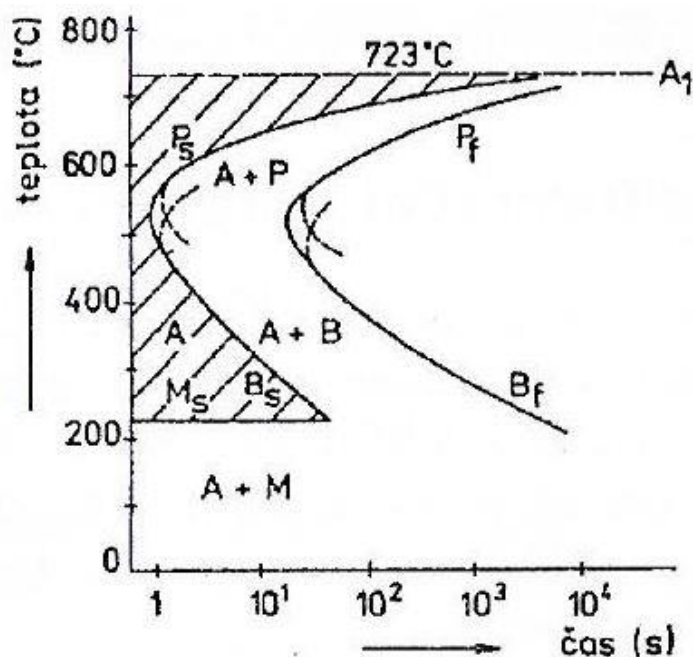
Diagramy IRA a ARA slouží k zobrazování změn probíhajících při tepelném zpracování s překrystalizací. Je to závislost teploty na čase. Diagram, kdy dochází k prudkému ochlazení oceli pod teplotu A_1 a následnou výdrž na určité teplotě až do konce přeměny, se nazývá izotermický rozpad austenitu (IRA), a diagram, kdy teplota klesá po celou dobu přeměny, se nazývá anizotermický rozpad austenitu (ARA). IRA a ARA diagramy jsou různé pro každou ocel a jsou si podobné, ARA diagram je však posunutý do nižších teplot. Tyto diagramy se určují experimentálně, a to tak, že pro každou teplotu (pro IRA diagram) nebo každou rychlost ochlazování (pro ARA diagram), při kterých probíhá rozpad, je získán různý časový záznam [6].

2.1.1 IRA diagram

IRA diagram je tvořen počátky a konci perlitické a bainitické přeměny. Tyto křivky mají tvar písmene „C“ – tzv. C-křivky. Vlevo od křivek začátků perlitické a bainitické přeměny (P_s a B_s) až po martenzitickou teplotu (M_s) se nachází austenit, vpravo od křivek konců přeměn (P_f , B_f) se nachází produkty přeměn.

V intervalu teplot od A_1 po teplotu zhruba 550°C („nos“ diagramu) vzniká izotermickým rozpadem austenitu lamelární perlit. Čím je teplota přeměny menší, tím je také menší mezilamelární vzdálenost perlitu. Za teplot nižších než 550°C až do teploty M_s vzniká přeměna bainitická. Horní bainit se zpočátku tvoří společně s perlitem, čím je teplota nižší, tím více převládá množství bainitu. Pod teplotou M_s probíhá pouze bezdifuzní martenzitická přeměna. Lze říci, že s klesající teplotou přeměny roste tvrdost a pevnostní charakteristiky, ale klesají hodnoty tvárnosti a houževnatosti [6].

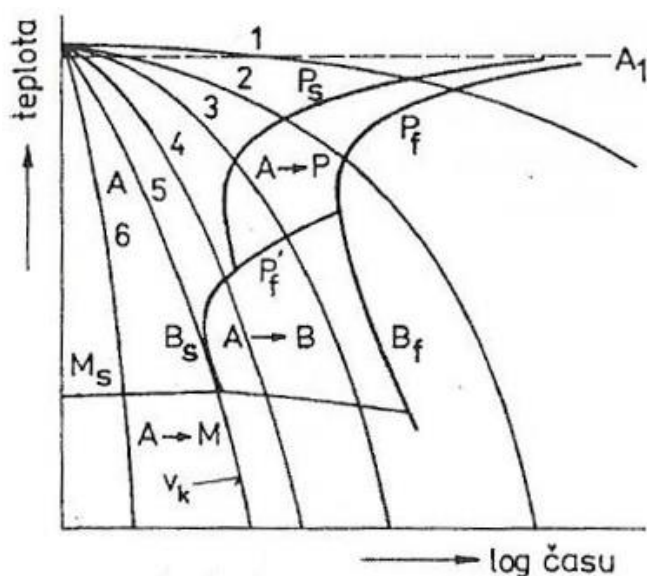
Obrázek 10: IRA diagram eutektoidní oceli [6].



2.1.2 ARA diagram

Diagram ARA zobrazuje také počátky a konce jednotlivých přeměn, které byly získány při plynulém ochlazování austenitu různými, v diagramu vyznačenými rychlostmi [6].

Obrázek 11: ARA diagram eutektoidní oceli [6].



Z obrázku 11 je zřejmé, že při velmi pomalém ochlazování eutektoidní oceli vzniká perlitická přeměna. S rostoucí rychlostí ochlazování se posouvá začátek i konec přeměny a zároveň se zkracuje celkový čas přeměny. Dosáhne-li rychlost přeměny určité hodnoty, perlitická přeměna neprobíhá do 100 %, a zbylý austenit transformuje na bainit. Výsledná struktura je tak perliticko-bainitická. Je-li rychlost přeměny ještě vyšší, přeměna austenitu začíná bainitickou přeměnou. Tato přeměna končí stoprocentním vznikem bainitu. Neproběhne-li však do 100 % vzniku bainitu, zbylý austenit transformuje na martenzit. Pokud je rychlost ochlazování vyšší než rychlost v_k (kritická rychlost kalení), výslednou strukturu tvoří pouze martenzit a jistý podíl zbytkového austenitu [6].

2.2 Druhy tepelného zpracování

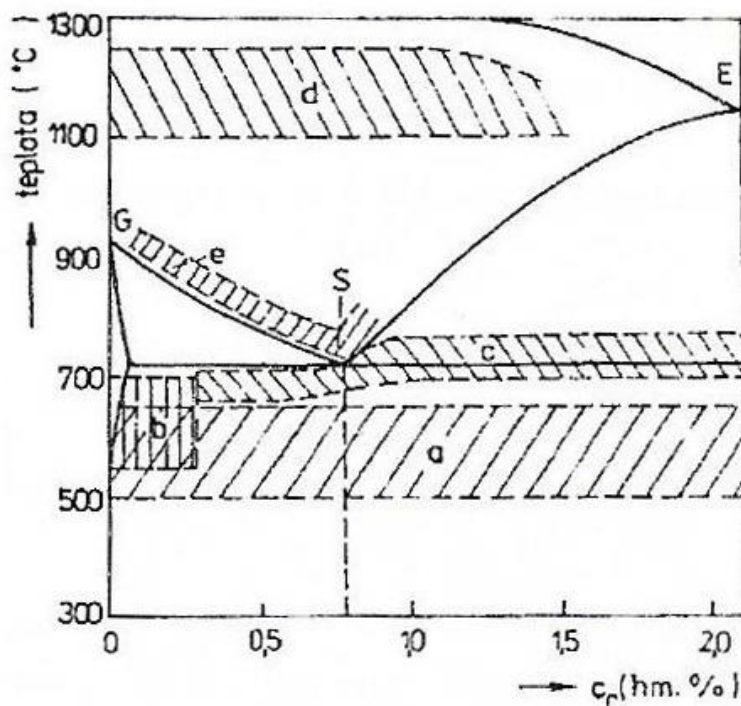
2.2.1 Žihání

Žihání je způsob tepelného zpracování, kdy hlavním cílem je získání struktury tvořené rovnovážnými fázemi. Charakteristickým znakem je proto pomalý ohřev, dlouhá výdrž na teplotě a pomalé ochlazování, které odpovídá ochlazování na klidném vzduchu. Tímto postupem je podporována difuze v materiálu.

Nejčastěji žiháním získáváme homogenní a jemnozrnnou strukturu, která se vyznačuje dobrou tvárností, houževnatostí i obrobiteľností. Vhodně zvoleným způsobem procesu docílíme potřebného chemického složení a snížíme úroveň vnitřního pnutí. Někdy lze žihání zvolit jako přípravnou operaci k následnému zpracování (tzv. mezižihání), kdy

dochází k usnadnění obrábění nebo k částečné obnově plasticity při tváření za studena [6], [7].

Obrázek 12: Zvýraznění žhacích pásem [6].



a .. žhání na odstranění pnutí, b .. rekrytalizační žhání, c .. žhání naměkko, d .. homogenizační žhání, e.. normalizační žhání

Podle toho, zda je teplota žhání vyšší nebo nižší než teplota A_1 , rozdělujeme žhání s překrytalizací nebo bez překrytalizace. Žhání bez překrytalizace zahrnuje u polymorfních ocelí takové způsoby žhání, kdy lze množství fázových přeměn považovat za nevýznamné. K tomu dochází při teplotách menších než A_1 . U nepolymorfních vysocelegovaných ocelí dochází vždy k žhání bez překrytalizace, protože s rostoucí teplotou se rozpouští karbidy a další vytvrzující látky ve feritu nebo austenitu. Při žhání s překrytalizací dochází k austenitizaci oceli z výchozí feriticko-cementitické struktury. Pondeutektoidní oceli se žhají nad teplotu A_3 , nadeutektoidní oceli nad teplotu A_m nebo mezi A_1 a A_m . Žháním s překrytalizací lze tak významně ovlivnit strukturu a mechanické vlastnosti ocelí a litin [6], [7].

Žhání na snížení pnutí

Žhání ke snížení vnitřních pnutí je druhem žhání bez překrytalizace. Jeho cílem je snížit nebo odstranit pnutí, která vznikla v součástech při jejich předchozím zpracování (např. sléváním, svařováním, tvářeními či obráběním). Tato pnutí je vhodné odstraňovat hned po ochlazení, aby se předešlo vzniku trhlin. Žhací teploty se v tomto případě pohybují v rozmezí 450 až 650°C; spodní hranice je závislá na poklesu meze kluzu nezbytným pro snížení pnutí plastickou deformací a horní hranice musí být menší o 20 až 30°C než popouštěcí teplota materiálu. Prodleva na žhací teplotě je závislá na její

hodnotě. Při maximálních žíhacích teplotách proto stačí výdrž 1 až 2 h. Důležité je, aby byla součást dostatečně prohřata. Ochlazování z žíhací teploty musí probíhat pomalu (v peci), aby nedošlo ke vzniku nových pnutí [6], [7], [8].

Náhradou žíhání na snížení vnitřního pnutí může být **vibrování**. Podstatou je rozkmitání součástky na rezonanční frekvenci, při které dochází k elastickým deformacím materiálu. Při těchto deformacích se v místě koncentrace napětí překračuje mez kluzu, následkem čehož vzniká plastická deformace. Tím dochází k přesunu napětí a jeho celkovému snížení. Tuto metodu lze využít u součástí menších rozměrů, které můžeme snadno přivážit nebo upnout k upínacímu stolu vibračního zařízení. Výhodami vibračního zpracování je zamezení deformace součásti po opracování, malá spotřeba energie a krátká doba zpracování a změna struktury a vlastností materiálu způsobená působením teploty. Nedochází však ke snížení vnitřního pnutí v takové míře jako u žíhání.

Rekrystalizační žíhání

U rekrystalizačního žíhání opět nedochází k překrystalizaci. Hlavní podstatou je zjemnění zrna po tváření za studena a odstranění deformačního zpevnění. Žíhací teploty se pohybují v rozmezí od 550 do 700°C u polymorfních ocelí, u ocelí austenitických až 1100°C. Prodleva na teplotě se pohybuje od 1 do 5 hodin. Ohřevem je urychlena difuze, zrna se spojují a dochází tak k obnovení tvárné struktury schopné další deformace. Teplota a doba žíhání jsou výrazně závislé na požadovaných vlastnostech součásti a stupni deformace [6], [7], [8].

Žíhání naměkko

Cílem žíhání naměkko je snížení tvrdosti materiálu, tudíž zlepšení obrobitelnosti a tvařitelnosti ocelí za studena. Při teplotách kolem A_1 dochází ke sferoidizaci perlitického a sekundárního cementitu. U podeutektoidních ocelí se žíhá na teploty od 600 do 720°C po dobu minimálně 4 hodin a následuje pomalé ochlazování v peci. Tím se změní lamelární perlit na zrnitý. U nadeutektoidních ocelí se užívá kolísavý ohřev nad teploty A_1 a následně velmi pomalé ochlazování (10 až 15°C/h) až k 600°C, kdy vzniká zrnitý perlit [6], [7], [8].

Homogenizační žíhání

Homogenizační žíhání je příkladem žíhání s překrystalizací. Používá se ke zmenšení nebo odstranění heterogenity chemického složení nebo mikrostruktury, která vzniká při tuhnutí odlitků v důsledku dendritické segregace. Provádí se za vysokých teplot od 1100 do 1250°C s výdrží na teplotě 5 až 15 h. Takovýmto dlouhodobým a vysokoteplotním ohřevem dochází ke zhrubnutí austenitických zrn, které zjemňujeme tvářením za tepla a následnou rekrystalizací nebo normalizací. Homogenizační žíhání je nákladná operace. Provádí se proto převážně u odlitků, které jsou vysoce namáhány nebo jsou z vysokolegovaných ocelí [6], [7], [8].

Normalizační žíhání

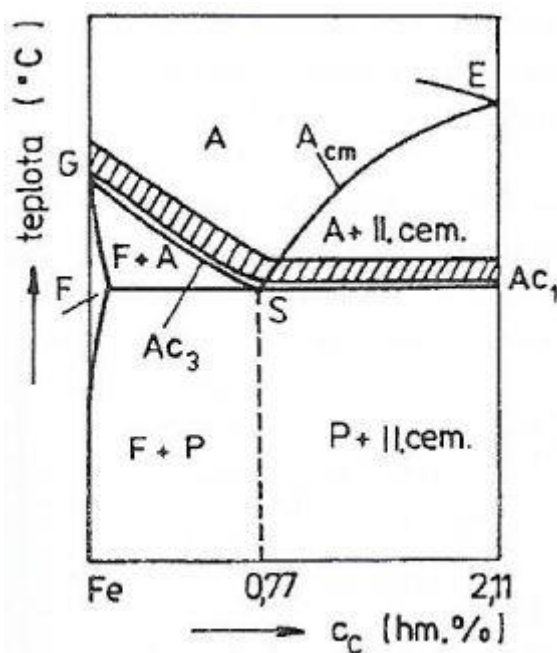
Cílem normalizačního žíhání je zjemnění struktury bez vnitřních pnutí a s dobrými mechanickými vlastnostmi. Zpravidla se používá pro výkovky, svařence a odlitky, kde se zjemní hrubá struktura a tím i odstraní nežádoucí Widmannstättenova struktura. Pro podeutektoidní oceli platí ohřev o 30 až 50°C nad teplotu A_3 , následně se pak pomalu ochlazuje na klidném vzduchu nebo pozvolně v peci. Velikost zrna je závislá na rychlosti ochlazování. Při malém přechlazení získáváme hrubější strukturu, která je

měkčí a tvárnější. Při větším přechlazení pak dostáváme strukturu jemnější, pevnější a tvrdší. U nadeutektoidních ocelí se normalizace provádí zřídka. Zde slouží k odstranění síťoví cementitu, a to ohřevem mezi A_1 a A_m a následným prudším ochlazením na proud vzduchu [6], [7].

2.2.2 Kalení

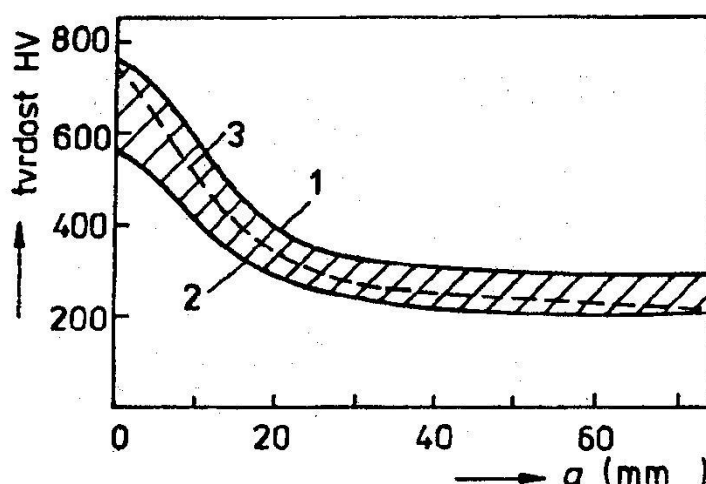
Kalení je takový způsob tepelného zpracování, při kterém vzniká nerovnovážný stav ocelí. Podle převládající struktury můžeme rozdělit kalení martenzitické a bainitické, ovšem většinou je cílem získat strukturu martenzitickou. Vlastnost, kdy lze dosáhnout martenzitické struktury, nazýváme kalitelnost. O těchto ocelích pak říkáme, že jsou kalitelné. Zakalitelnost je vlastnost oceli, která se hodnotí její tvrdostí po kalení. Hodnota tvrdosti je závislá na tvrdosti martenzitu, která závisí na obsahu uhlíku v austenitu. Jako prokalitelnost se uvádí tvrdost po kalení odpovídající zakalitelnosti v určité hloubce pod povrchem kalené součásti. Hodnoty kalitelnosti a zakalitelnosti jsou materiálovými charakteristikami. Prokalitelnost oceli lze určit různými metodami, jako například Jominyho zkouškou prokalitelnosti [7], [8].

Obrázek 13: Pásma kalicích teplot [6].



Kalicí teplota podeutektoidních ocelí se pohybuje o 30 až 50°C nad teplotou A_3 . Díky této teplotě dochází jednak k dosažení homogenního austenitu a jednak i k zachování jemného austenitického zrna. U nadeutektoidních ocelí se provádí ohřev o 30 až 50°C nad teplotu A_1 . Správně zakalená struktura musí obsahovat martenzit, jistý podíl austenitu a nerozpuštěný sekundární cementit. Pokud by se prováděl ohřev nad teplotu A_m , sekundární cementit se rozpustí, zhrubne austenitické zrna a zvýší se koncentrace uhlíku v austenitu, což vede k většímu obsahu uhlíku v martenzitu po zakalení, jeho zhrubnutí a zvýšení podílu austenitu. Tato struktura je proto měkčí a křehčí, proto je nežádoucí [7], [8].

Obrázek 14: Pás prokalitelnosti oceli [9].



1, 2 .. hranice pásu prokalitelnosti, 3 .. křivka prokalitelnosti

Velmi důležitým faktorem je rychlost chladnutí, která musí být jen o něco málo vyšší než kritická rychlost. Optimální kalicí prostředí je takové, které má velikou ochlazovací účinnost v oblasti perlitické přeměny (650 až 550°C) a malou účinnost v oblasti martenzitické přeměny (350 až 250°C). Až příliš pomalá rychlost ochlazování však není vhodná, protože může dojít ke stabilizaci zbytkového martenzitu.

Nejlepším chladicím prostředkem je voda. Je nenáročná, levná, nehořlavá a tudíž i nejběžnější kalicí prostředí. Díky její ochlazovací účinnosti v ní lze zakalit i uhlíkové oceli. Ochlazovací účinnost vody se zvyšuje jejím pohybem, přísadami kyselin, solí nebo louhu. Přidáním rozpustných polymerů zpomalíme ochlazovací účinek vody, což vede k odstranění měkkých míst, deformací a trhlin v součásti. Oleje v porovnání s vodou mají 3x – 4x menší ochlazovací rychlost v oblasti perlitické přeměny, a až 10x menší ochlazovací rychlost v oblasti martenzitické přeměny. Vysoké využití mají oleje ke kalení vysocelegovaných ocelí. Jejich výhodou je vznik malých vnitřních pnutí, nevýhodou však to, že se mohou vznítit a jsou neekologické. Syntetické oleje jsou vhodnější pro užívání než minerální, protože mají delší životnost, splňují náročnější bezpečnostní podmínky a méně zatěžují životní prostředí. Nejmírnějším kalicím prostředím je vzduch. Jeho účinek lze zvýšit buď prouděním, nebo kombinací s vodou – vodní mlha. Na vzduchu se kalí samokalitelné oceli (středně a vysoko legované). Pro termální kalení a izotermické zušlechťování se používají teplé lázně. Jako kalicí prostředí zde slouží taveniny kovů (Pb, Pb a Sn), olejů nebo tavenin solí. Chladicí účinnost je velmi malá, lze ji zvýšit pouze cirkulací nebo přidáním vody do 0,5 % obsahu [6], [8].

Martenzitické kalení

Nejjednodušším a nejpoužívanějším způsobem je martenzitické kalení. Kalí se do vody, vzduchu i oleje. Disponuje technologickou nenáročností a nízkou provozní cenou. Hlavními nedostatky jsou vznik velkých vnitřních pnutí a následných deformací součástí. Při přerušovaném (lomeném) kalení probíhá rychlé ochlazování až těsně nad teplotu M_s , následující mírnějším ochlazením, při kterém proběhne martenzitická přeměna. Toto kalení vede ke snížení úrovně vnitřních pnutí a používá se u složitých a rozměrných součástí. Průběh termálního kalení sestává ochlazení v lázni a dostatečné

prodlevy na teplotě těsně nad M_s , při níž dochází k prohřevu součásti, což má za následek potlačení pnutí. Tato prodleva však nesmí být delší, než inkubační doba bainitické přeměny. Nakonec dochází k úplnému ochlazení, kdy vzniká martenzit [6], [7], [8].

Bainitické kalení

Při bainitickém kalení musí být rychlost menší, než je kritická rychlost, ovšem musí být taková, aby byla zaručena bainitická přeměna. Jednou z forem tohoto druhu kalení je izotermické zušlechťování, při kterém se výrobek ohřeje na kalicí teplotu a následně se přesune do termální lázně, kde proběhne bainitická přeměna (kolem 300 až 400°C). Nakonec dochází ke chladnutí na vzduchu. Další formou je izotermické kalení. Při izotermickém kalení se součást po ohřevu na kalicí teplotu přesune do lázně, která má teplotu média těsně pod teplotou M_s . Po vyrovnaní teplot strukturu tvoří směs martenzitu, bainitu a zbytkového austenitu. Popouštěním takovéto součásti s martentiticko-bainitickou strukturou, kde podíl bainitu nepřesahuje 25 % obsahu, získáváme ideální kombinaci pevnosti a houževnatosti [6], [7], [8].

Kalení se zmrazováním

Cílem tohoto způsobu kalení je zmenšit podíl zbytkového austenitu ve struktuře. To se dosáhne přesunem již zakalené součásti do prostředí s teplotou pod bodem mrazu. Přesun musí být však velmi rychlý, aby nedošlo ke stabilizaci zbytkového austenitu. Tento postup je důležitý u součástí náročných na rozměrovou stabilitu (měřidla, valivá ložiska, nástroje) nebo u součástí s teplotou M_f pod bodem mrazu [6], [8].

Oceli s odolností proti abrazivnímu opotřebení, například oceli Hardox, které jsou popsány v kapitole 4, získávají svou otěruvzdornost právě hloubkovým kalením při jejich výrobě.

2.2.3 Popouštění

Jako popouštění označujeme takový druh tepelného zpracování, který zpravidla následuje ihned po kalení a ve kterém prochází změnami nerovnovážné fáze (martenzit a zbytkový austenit). Tyto změny jsou závislé na chemickém složení oceli a teplotě popouštění. Popouštění se skládá z ohřevu na teplotu nižší než teplota A_1 , následné výdrži na teplotě a ochlazování vhodnou rychlostí. Nejdůležitější fázovou přeměnou je zde precipitační rozpad tetragonálního martenzitu. Současně s martenzitem se rozpadá i zbytkový austenit, dochází k relaxaci vnitřních pnutí a při vyšších teplotách ve feritické fázi k zotavení. Tyto uvedené fázové přeměny lze rozdělit do čtyř stádií popouštění [6], [8].

- V 1. stádiu popouštění dochází k rozpadu tetragonálního martenzitu na kubický martenzit (s obsahem uhlíku do 0,125 hm. %) a nerovnovážný karbid ϵ ($Fe_{2,4}C$), což vede ke změně měrného objemu. Tento karbid ϵ precipituje na hranicích zrn martenzitu a má velký vytvrzující účinek, což do značné míry kompenzuje pokles tvrdosti způsobený poklesem zpevnění martenzitu. Toto stádium probíhá do 200°C a schéma je $M \rightarrow M' + \epsilon$.
- 2. stádium popouštění probíhá v rozmezí teplot od 200 do 300°C. Za těchto teplot dochází k rozpadu zbytkového austenitu na bainitickou strukturu, která se podobá martenzitické struktuře popouštěné na stejnou teplotu. V tomto stádiu dochází ke zvětšení měrného objemu, uvolnění tepla a snížení vnitřních pnutí. Rozpad austenitu má za následek také zmenšení tvrdosti.

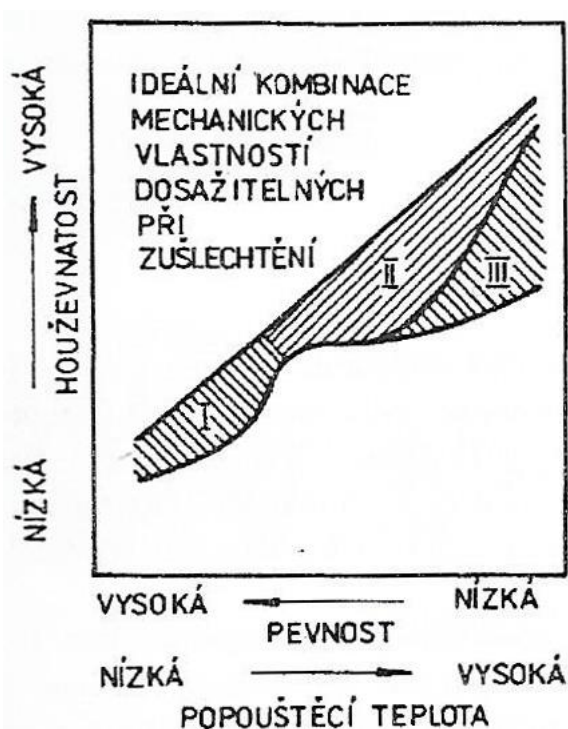
- Nad 300°C probíhá 3. stádium popouštění, při kterém se tvoří cementit za současného rozpadu martenzitu na ferit ($M' + \epsilon \rightarrow F + Fe_3C$). Dochází k rozpouštění ϵ -karbidů, poklesu obsahu uhlíku, růstu cementitických zrn a jejich hrubnutí. S rostoucí teplotou popouštění se cementit mění z tyčinkového na zrnitý. Celková matrice se mění z jehlicovité na polyedrickou. Tyto změny mají za důsledek pokles pevnosti a tvrdosti, avšak zvýšení tvárnosti a houževnatosti. Výsledkem těchto změn vzniká jemná feriticko-cementitická struktura, pojmenovávaná jako sorbit.
- 4. stádium popouštění probíhá za teplot vyšších než 500°C, kdy hrubnou zrna cementitu kvůli jejich srůstání a sferoidizaci s následnou rekrystalizací a hrubnutím feritických zrn. Zhrublý sorbit se pak nazývá zrnitý perlit. Nízkolegované oceli zle ve 4. stádiu popouštění obohatit o karbidotvorné prvky (chrom, mangan), u legovaných ocelí vznikají speciální karbidy. Precipitace těchto karbidů vzniká díky difuzi substitučních prvků [6].

Popouštěcí teplota má rozhodující vliv na strukturní změny a mechanické vlastnosti součásti. Rozlišujeme proto popouštění za nízkých a vyšších teplot. Napouštěním nazýváme popouštění za nižších teplot, to je od 100 do 300°C (u vysocelegovaných ocelí až 600°C). Cílem napouštění je snížit stupeň vnitřních pnutí, snížit obsah zbytkového austenitu a stabilizovat rozměry součástí. Popouští se ve vařící vodě, teplé olejové lázni, v solných lázních nebo v elektrických pecích. Využití nachází při výrobě valivých ložisek, součástí po cementaci a povrchovém kalení. Popouštění při vysokých teplotách se nazývá anizotermické zušlechťování, pásmo teplot je od 400 do 650°C. Hlavní strukturou při tomto způsobu popouštění je sorbit. Tato struktura zajišťuje ideální kombinaci pevnostních charakteristik, houževnatosti a plasticity.

2.2.3.1 Popouštěcí křehkost

S rostoucí teplotou popouštění by měly růst i hodnoty houževnatosti. Ve skutečnosti se však může stát, že tyto hodnoty budou výrazně nižší. Hovoříme proto o popouštěcí křehkosti, u které rozlišujeme 3 druhy. Při teplotách v rozmezí 350 až 450°C vzniká nízkoteplotní popouštěcí křehkost. Nevhodnou velikostí cementitických zrn, jejich tvarem a distribucí může vznikat transkrystalický štěpný lom. Úpravou běžných podmínek popouštění nelze nízkoteplotní popouštěcí křehkost výrazně ovlivnit, proto je označována jako neodstranitelná. Vysokoteplotní popouštěcí křehkost nastává při teplotách okolo 550°C a dělí se na dvě složky, a to izotermickou a anizotermickou. Příčinou popouštěcí křehkosti je segregace nečistot na hranicích austenitických zrn. Tuto segregaci také zvětšují legující prvky jako nikl, mangan, chrom a křemík. K částečnému potlačení vysokoteplotní rozpouštěcí křehkosti pak přispívají molybden, popřípadě wolfram. Přítomnost těchto prvků je velice důležitá při výrobě součástí o velkém průřezu, nebo součástí, které jsou tepelně namáhány (tlakové nádoby, součásti parních turbín). Vysokoteplotní popouštěcí křehkost lze odstranit novým kalením a popouštěním, proto ji označujeme jako vratnou. Podmínkou je kratší doba popouštění a rychlejší ochlazení z popouštěcí teploty [6].

Obrázek 15: Oblast popouštěcí křehkosti [6].



Oblast I – pásmo nízkoteplotní popouštěcí křehkosti; Oblast II – pásmo izotermické vysokoteplotní popouštěcí křehkosti; Oblast III – pásmo anizotermické vysokoteplotní popouštěcí křehkosti

3. Otěruvzdorné oceli

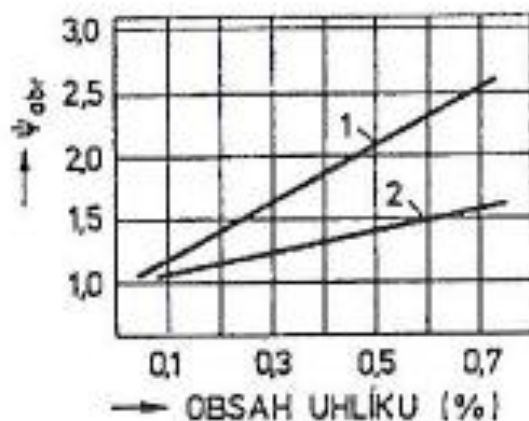
Otěruvzdorné materiály jsou definované jako materiály se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení. Abrazivní opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu tělesa, která je způsobena vzájemným působením povrchu tělesa a abrazivního média, což se projevuje rýhováním a odřezáváním částic tělesa. Abrazivní částice, které se zatlačují do povrchu součásti, mohou být nesené kapalinou nebo plynem. Toto opotřebení se objevuje pouze na povrchu těles a závisí na vlastnostech abrazivních částic (tvrdost, tvar) a na velikosti měrného tlaku, kterým jsou abrazivní částice přitlačovány na součást.

Odolnost proti abrazivnímu opotřebení je závislá na množství uhlíku, tepelném zpracování materiálu a na množství legujících prvků [10].

3.1 Nelegované oceli

U nelegovaných ocelí má významný vliv na odolnost proti abrazivnímu opotřebení pouze množství uhlíku a tepelné zpracování materiálu. Do obsahu 0,7 % je vliv uhlíku výrazný, potom se snižuje. Koeficient vyjadřující poměr tvrdosti abraziva a oceli ψ (H_{abr}/H_{ocel}) musí být menší než 2 [10].

Obrázek 16: Vliv uhlíku na odolnost nelegovaných ocelí proti abrazivnímu opotřebení [10].



1 .. kalené oceli, 2 .. normalizačně žíhané oceli.

3.2 Nízkolegované oceli

Nízkolegované oceli mají nižší abrazivní odolnost než vysokolegované oceli. Hodnota poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení se proto pohybuje v rozmezí 1,5 až 2,0. Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení u těchto ocelí závisí na množství uhlíku a tvrdosti, legující prvky pak ovlivňují prokalitelnost oceli. Chceme-li dosáhnout dobrých hodnot houževnatosti a pevnosti, využíváme oceli s nízko popuštěnou martenzitickou nebo bainitickou strukturou a obsahem uhlíku kolem 0,4 %. Typickým příkladem je ocel s obsahem uhlíku 0,41 %, která má díky vysokoteplotnímu tepelně mechanickému zpracování bainitickou strukturu. Její odolnost je proto mírně vyšší než u legovaných ocelí. Platí, že při vyšších teplotách kalení po tváření klesá hodnota poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Chemické složení vybraných ocelí odolných proti abrazivnímu opotřebení je uvedeno v tabulce 2, tabulka 3 popisuje chemické složení některých ocelí na odlitky [10].

Tabulka 2: Nízkolegované oceli se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení [10].

Značka	Chemické složení v %							
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	
42 2711	0,65 - 0,80	1,10 - 1,60	0,20 - 0,50					
42 2735	0,50 - 0,65	0,90 - 1,30	0,20 - 0,50	0,90 - 1,30				
42 2736	0,60 - 0,75	0,80 - 1,20	0,20 - 0,50	1,80 - 2,20				
42 2739	0,45 - 0,60	0,50 - 0,90	0,20 - 0,50	0,60 - 0,90				
42 2753	0,70 - 0,85	0,60 - 0,90	0,20 - 0,50	1,30 - 1,70	0,50 - 0,80	0,40 - 0,60	0,10 - 0,25	
14 281	0,70 - 0,80	1,00 - 1,50	0,20 - 0,35	0,70 - 1,00				

Tabulka 3: Oceli s vysokou pevností používané na odlitky namáhané abrazivním opotřebením [10].

Chemické složení v %								
C	Mn	Cr	Mo	Si	Cu	Ni	V	B
0,30	1,15	0,40	0,25					
0,15	0,80		0,50	0,40	0,40	0,80	0,06	0,005
0,30	0,80	0,80	0,40	1,50		1,80	0,10	
0,28	1,50	0,70	0,50	0,45				
0,32	1,15		0,25	0,50				
0,35	0,80	0,80	0,40	0,50				

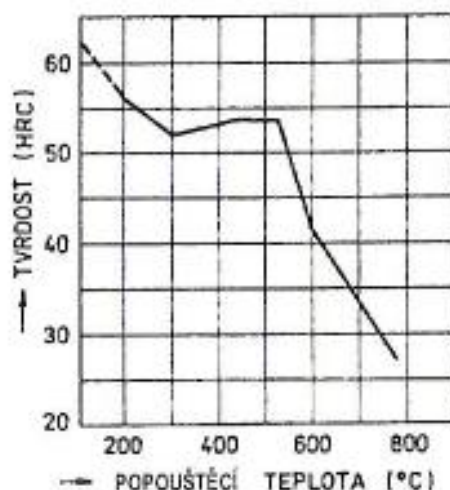
3.3 Střednělegované oceli

Oceli v této skupině jsou legovány takovými prvky, které přispívají k větší prokalitelnosti a tvrdosti cementitu. Obsah uhlíku se volí v takovém množství, aby se dosáhlo vyloučení dostatečného množství nadeutektoidních karbidů, které zvyšují odolnost proti opotřebení.

Pro odlitky odolné proti abrazivnímu opotřebení se používá ocel s 0,8 až 1,2 % uhlíku. Legující prvky, které zvyšují prokalitelnost těchto ocelí, jsou chrom a molybden. Díky těmto prvkům lze kalit i součásti s větší tloušťkou stěny, a to do oleje nebo na vzduchu. Tyto odlitky je možné obrábět po žihání naměkko na teplotu 760°C, následném ochlazení v peci na 600°C a konečném ochlazení na vzduchu. Optimální kalicí teploty se pohybují v rozmezí 980 až 1040°C. Nižší kalicí teploty nejsou vhodné, protože se v austenitu rozpustí příliš malé množství uhlíku, vyšší kalicí teploty nejsou vhodné kvůli vytvoření vysokého podílu zbytkového austenitu, který také snižuje tvrdost.

Na obrázku 20 je vidět závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě. Z této závislosti lze říci, že popouštěcí teplota nesmí být větší než 200°C. Čím je tato teplota vyšší, tím více klesá tvrdost [10].

Obrázek 17: Vliv popouštěcích teplot na tvrdost oceli na odlitky 6/1 [10].



3.4 Austenitické manganové oceli

Austenitická manganová ocel má své charakteristické vlastnosti, pro které je velmi ceněna. Její povrchové vrstvy jsou velmi tvrdé, což zvyšuje odolnost proti abrazivnímu opotřebení, jádro však zůstává houževnaté, proto tyto součásti snášejí vysoké namáhání. Tyto oceli obsahují 1,0 až 1,5 % uhlíku a 11,5 až 14,5 % manganu, některé oceli mohou obsahovat až 1,2 % chromu. Chemické složení vybraných ocelí je popsáno v tabulce 4 [10].

Tabulka 4: Chemické složení austenitických manganových ocelí [10].

Značka	Chemické složení v %					
	C	Mn	Si max.	P max.	S max.	Cr
17 618	1,10 - 1,40	11,0 - 13,0	1,00	0,100	0,040	
42 2920	1,10 - 1,50	12,0 - 14,0	0,70	0,100	0,050	
42 2921	1,10 - 1,50	12,0 - 14,0	0,70	0,100	0,050	0,70 - 1,20

3.4.1 Legování austenitických manganových ocelí

Množství uhlíku u těchto ocelí zásadně ovlivňuje jejich vlastnosti. Zatímco odolnost proti abrazivnímu opotřebení s rostoucím množstvím uhlíku roste, zvyšuje se však i náchylnost k tvorbě trhlin, protože se při chladnutí vylučuje na hranicích zrn větší množství karbidů. U složitých součástí se proto doporučuje snížit množství uhlíku na spodní hranici, aby se zamezilo vzniku velkého množství karbidů, nebo přidat malé množství titanu. Obsah manganu v těchto ocelích dosahuje množství od 11 do 14 %. Toto množství nemá žádný vliv na odolnost proti abrazivnímu opotřebení, zlepšuje však

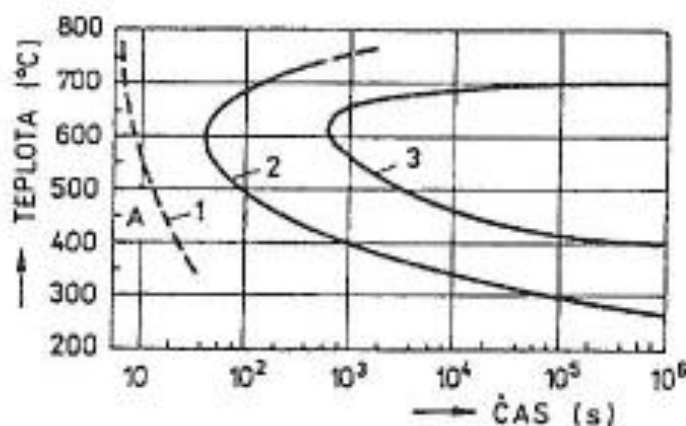
plastické vlastnosti oceli. Některé druhy těchto ocelí se legují chromem, a to množstvím kolem 1 %. Zvyšuje se tak mez kluzu, klesá vrubová houževnatost (zůstává však dostatečně vysoká) a snižují se plastické vlastnosti. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení se přidáním chromu opět nemění. Přítomnost křemíku nepříznivě ovlivňuje vrubovou houževnatost těchto ocelí, proto smí obsahovat pouze 0,7 %, u tvářených ocelí pak maximálně 1,0 %. Křemík snižuje rozpustnost uhlíku v austenitu, proto dochází ke vzniku drobných karbidů, které tvoří řetízky po hranicích zrn. Fosfor se u těchto austenitických manganových ocelí vyskytuje ve vyšším množství než u běžných konstrukčních ocelí a to ve formě fosfidového eutektika. To se částečně rozpouští až při tepelném zpracování, úplně zmizí až po dlouhých výdržích při teplotách nad 1150°C. Jeho přítomností klesá odolnost proti abrazivnímu opotřebení (výraznější pokles kolem 0,08 % P) i vrubová houževnatost (nad 0,1 % P). K dezoxidaci austenitických manganových ocelí se používá hliník. Vrubová houževnatost klesá již při velmi malém množství hliníku, je-li hliníku však předepsané množství k dezoxidaci, vrubová houževnatost zůstává nad hodnotami předepsanými normou. Maximálně 0,05 % titanu lze použít ke zjemnění zrna. Při vyšším obsahu titanu však také klesá vrubová houževnatost. Ferotitany obsahují až 8 % hliníku, proto se při legování ocelí titanem také zvyšuje obsah hliníku. Legováním 2 % molybdenu dochází ke zvyšování meze kluzu i odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Výrazně se však i zvyšuje cena oceli, proto je toto legování problematické [10].

3.4.2 Tepelné zpracování austenitických manganových ocelí

Cílem tepelného zpracování je získat homogenní nemagnetickou matici. To se získá ohřátím materiálu na teploty rozpouštěcího žhání (1030 až 1080°C), kdy se karbidy rozpouští v austenitu, a následným ochlazením ve vodě. Ochlazení musí být dostatečně rychlé, aby se potlačilo zpětné vyloučení karbidů. Výdrž na teplotě závisí na tloušťce materiálu; obecně platí, že na prohřátí 25 mm oceli je třeba hodinová výdrž na teplotě. Při prudkém ochlazování se není třeba bát popraskání, materiál je dostatečně houževnatý.

Pro austenitické manganové oceli je typická vysoká tepelná roztažnost a malá teplotní vodivost. Proto je nutné součásti z těchto ocelí předežhřívát. Komplikované odlitky se vkládají do pece s teplotou do 200°C, s rychlostí ohřevu 80 až 100°C* hod^{-1} , čím větší je tloušťka stěny, tím pomaleji se musí ohřívat; nad 750°C už lze ohřívat rychleji. U silnostěnných odlitků se doporučuje výdrž na teplotě kolem 630°C, kdy dojde k vyrovnání teplot povrchu a jádra součásti, čímž se sníží míra pnutí v odlitku vzniklá ohřevem. Při novém ohřevu těchto ocelí (například při svařování) i při pomalém ochlazování po rozpouštěcím žhání se vylučují karbidy a dochází k částečnému rozpadu austenitu na jemný perlit. Tyto pochody zobrazuje obrázek 18 [10].

Obrázek 18: Diagram IRA austenitické manganové oceli [10].



A .. homogenní metastabilní austenit, 1 .. vylučování podvojného cementitu na hranicích zrn, 2 .. tvorba dlouhých jehlic cementitu, 3 .. částečná transformace austenitu na jemný perlit

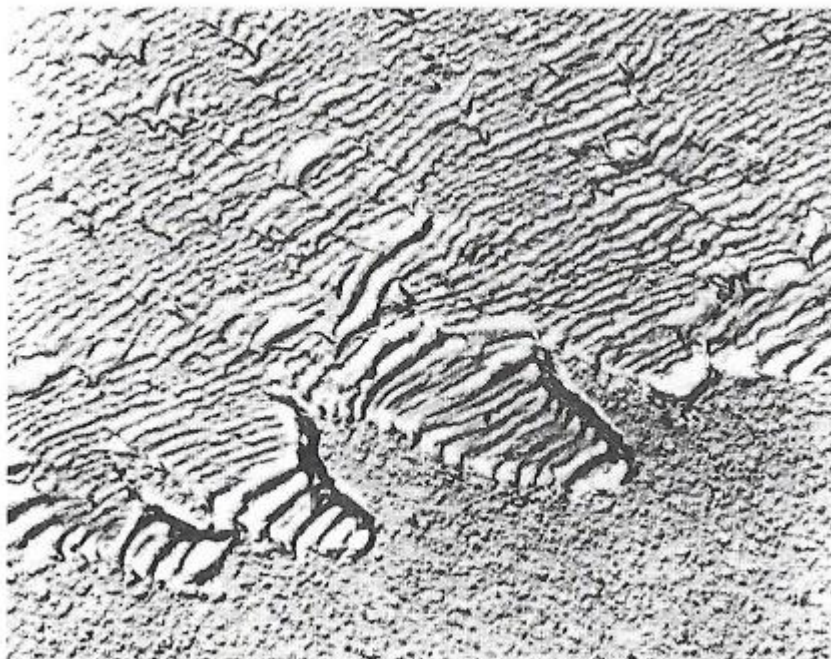
3.4.3 Vliv velikosti zrna na odolnost proti opotřebení

Velikost zrna je také jeden z faktorů, které ovlivňují mechanické vlastnosti ocelí, odolnost proti opotřebení a pevnost v tahu. Je-li ocel jemnozrná, legování molybdenem i vanadem ztrácí význam, protože se téměř nemění mechanické vlastnosti oceli. Význam má pouze dodatečné legování titanem, a to pouze u odlitků s větší tloušťkou stěny. Jemnozrnnost oceli je pro nás důležitá, protože jemnozrné oceli jsou více odolné proti abrazivnímu opotřebení [10].

3.4.4 Perlitizace

Perlitizace je také jeden ze způsobů, jak zvýšit odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Je to způsob tepelného zpracování, kdy se odlitky s austenitickou strukturou vyžihají při teplotách 500 až 600°C, po čemž následuje hodinová výdrž na těchto teplotách. Při tomto procesu se rozpadá austenit a tvoří jemný perlit. Po výdrži na teplotách následuje rozpouštěcí žíhání na teploty 970 až 1010°C a ochlazení ve vodě. Tím se rozpustí pouze část karbidů. Zbylé karbidy zůstávají v matici a tvoří jemné precipitáty, které snižují opotřebení. Tímto postupem však klesá houževnatost oceli [10].

Obrázek 19: Jemný perlit vyloučený v matici austenitické manganové oceli. Zvětšení 1500 krát [10].

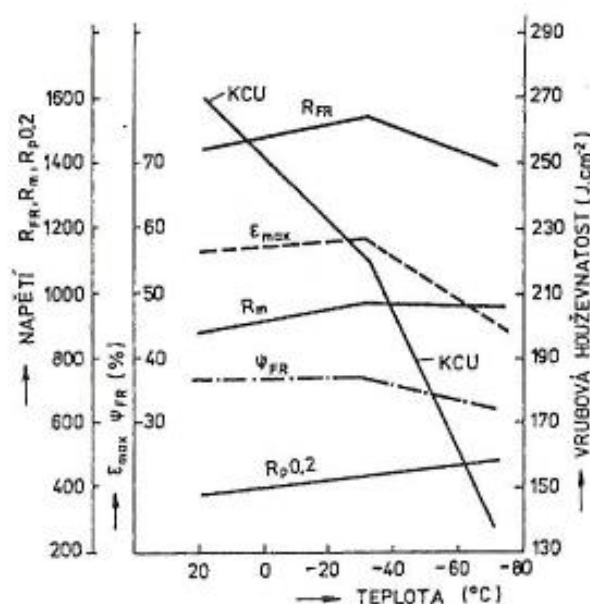


3.4.5 Mechanické vlastnosti austenitických manganových ocelí

Po žíhání austenitických manganových ocelí na teplotu 1050°C a ochlazení ve vodě mají tyto oceli vysokou vrubovou houževnatost, která dosahuje hodnot kolem 300 J*cm⁻². Klesá-li teplota okolí na hodnoty pod bod mrazu, klesá i vrubová houževnatost, do teplot až -70°C však zůstává stále poměrně vysoká. Mez kluzu těchto ocelí je nízká. Při teplotách pod 0°C se však mírně zvyšuje, toto platí i pro pevnost v tahu a ohybu.

Obrázek 20 znázorňuje závislost mechanických vlastností na okolní teplotě. S rostoucí zápornou hodnotou teploty klesá vrubová houževnatost. Při teplotách nižších než -40°C klesá i napětí při přetržení, tažnost při přetržení, mez pevnosti a zúžení při přetržení. Jak už bylo řečeno, mez kluzu s klesající teplotou mírně roste [10].

Obrázek 20: Vliv záporných teplot na mechanické vlastnosti austenitické manganové oceli [10].



$R_{p0,2}$.. mez kluzu, R_{FR} .. napětí při přetržení, ψ_{FR} .. zúžení při přetržení, ϵ_{max} .. tažnost při přetržení, KCU .. vrubová houževnatost

3.4.6 Zpevnění pracovního povrchu austenitických manganových ocelí

Schopnost zpevňovat je důležitou vlastností těchto austenitických manganových ocelí. K tomu je třeba dostatečného tlaku nebo rázu, proto se tyto oceli pouze při abrazivním namáhání nemají možnost zpevnit. Poměrná odolnost proti opotřebení pak dosahuje hodnot kolem 1,5. Je dokázáno, že rychlost deformace a podmínky namáhání (tlakové, tahové nebo ohybové) ovlivňují mechanismus zpevňování [10].

V počátečním stádiu deformace dochází k pohybu soustavy dislokací, čímž vznikají vrstevné chyby a dvojčatění lamel. V následujícím stádiu deformace dochází k tomu, že strukturní poruchy zabrání pohybu soustavy dislokací, a tím dojde ke zvýšení jejich hustoty. Zároveň se i zvyšuje hustota dvojčatových lamel, které rozdělují matici na stále menší části. Nově vzniklé dislokace ve své původní formě nemohou přejít přes dvojčatovou lamelu, proto vznikají nové, tzv. „interface“ dislokace, které se mohou pohybovat až za vyššího napětí. Čím jemnější je matrice, rozdělená dvojčatovými lamelami, tím je větší hustota těchto interface dislokací a tím větší napětí je potřebné k plastické deformaci. V místech s maximální koncentrací těchto dislokací se také hromadí uhlík. V deformačně zpevněné vrstvě se proto nachází vrstevné chyby, síť kluzových dislokací a dvojčatové lamely, jejichž celkové množství a poměr určuje stupeň deformačního zpevnění [10].

4. Vybrané otěruvzdorné plechy a jejich vlastnosti

4.1 Hardox 450

Hardox 450 je obchodní označení oceli odolné proti abrazivnímu opotřebení s nominální tvrdostí 450 HBW¹. Tyto oceli disponují výbornými konstrukčními vlastnostmi, jako jsou dobrá ohebnost za studena a svařitelnost, zaručena je i dobrá houževnatost [11].

4.1.1 Vlastnosti a chemické složení

Zaručená tvrdost oceli Hardox 450 je v rozmezí 425 až 475 HBW. Mez kluzu odpovídá 1200 MPa, mez pevnosti pak 1400 MPa, hodnota tažnosti je 10 %. Nárazová práce odpovídá hodnotám 40 J při teplotě -40°C [12].

Plechý z této oceli se standardně vyrábí v tloušťkách od 3 do 80 mm. Chemické složení a uhlíkové ekvivalenty jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Chemické složení a uhlíkový ekvivalent plechu Hardox 450 [13].

Plate thickness mm	C max %	Si max %	Mn max %	P max %	S max %	Cr max %	Ni max %	Mo max %	B max %	CEV typv.	CET typv.
3*) –(8)	0,19	0,70	1,60	0,025	0,010	0,25	0,25	0,25	0,004	0,41	0,30
8 – 20	0,21	0,70	1,60	0,025	0,010	0,50	0,25	0,25	0,004	0,47	0,34
(20)– 40	0,23	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	0,25	0,25	0,004	0,57	0,37
(40)– 50	0,23	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	0,25	0,60	0,004	0,59	0,36
(50)– 80	0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,00	0,60	0,004	0,72	0,41

*) Plate thickness below 4 mm only after special agreement.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

*Plate thickness .. tloušťka plechu, CEV, CET .. uhlíkové ekvivalenty, *) Tloušťka plechu pod 4 mm pouze po zvláštní dohodě.*

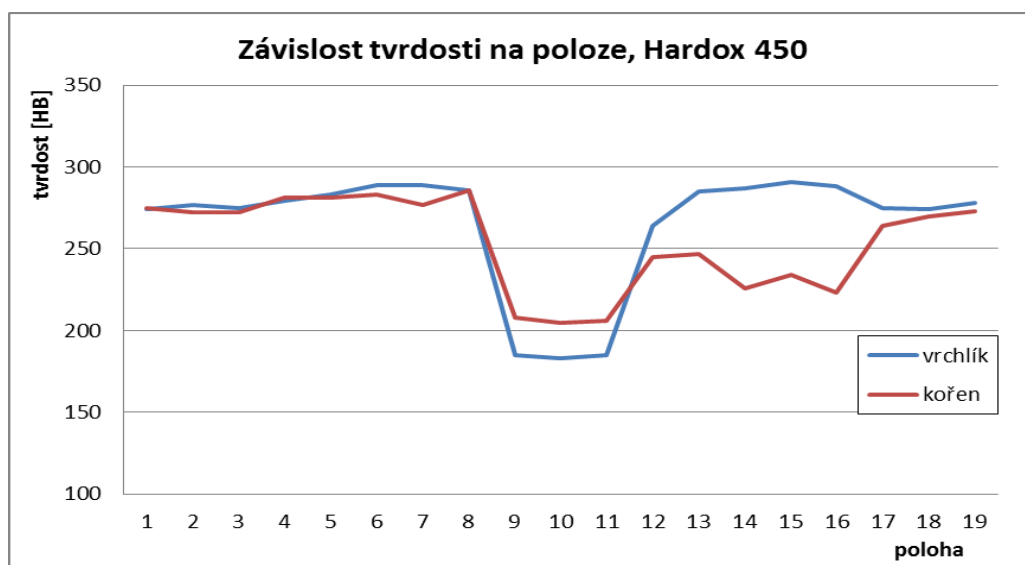
4.1.2 Svařitelnost, možnost tepelného zpracování

Otěruvzdorné oceli Hardox 450 lze snadno svařovat různými metodami. Do tloušťky 50 mm není nutno předehřívát. Je-li materiál silnější než 50 mm, mohlo by při svařování docházet kvůli výrazným rozdílům teplot k velkému vnitřnímu pnutí. Tím by se zvýšilo riziko vzniku trhlin a materiál by ztratil své vlastnosti. Výrobce není doporučeno tento materiál předehřívát na vyšší teploty než 250°C, proto lze tyto materiály pouze popouštět, a to do jediné do této teploty. Při svařování je nutné kontrolovat teplotu, aby se následným svařováním nepřekročila kritická hodnota [11].

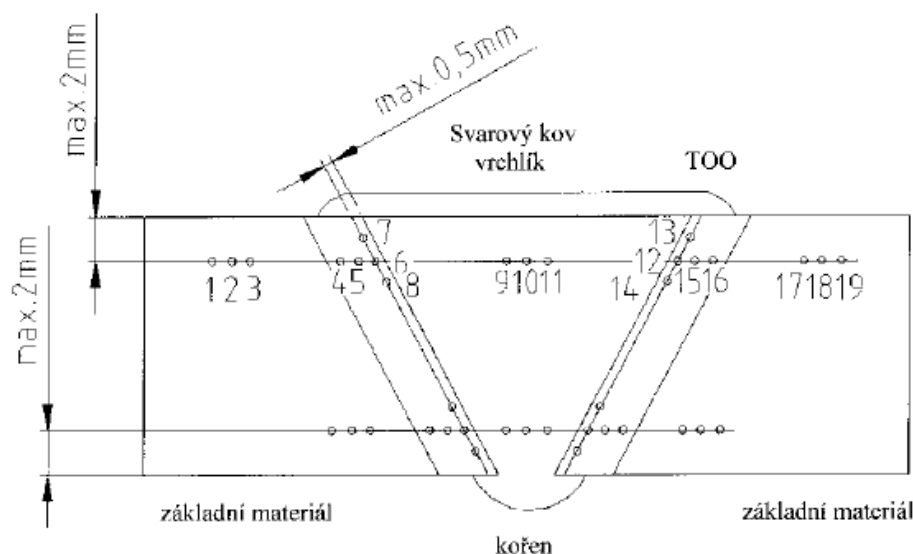
¹ HBW je jednotka tvrdosti podle Brinella, indentorem je kulička ze slinutých karbidů. Obvykle je tento indentor používán pro zkoušky materiálů větší tvrdosti.

Z projektu vyplynulo, že obloukovým svařováním metodou MAG lze plechy Hardox 450 snadno svářet i s jinými materiály, od běžných konstrukčních ocelí až po další druhy otěruvzdorných materiálů. Následným tepelným zpracováním ale došlo k významnému poklesu tvrdosti, a to na hodnoty kolem 270 HB v základním kovu, v tepelně ovlivněné oblasti byl pak zaznamenán mírný růst tvrdosti na hodnoty v rozmezí od 250 do 290 HB. Svarový kov vykazuje nízké hodnoty tvrdosti, a to v rozmezí od 185 do 208 HB. Výsledky měření zobrazuje následující obrázek.

Obrázek 21: Závislost tvrdosti na poloze, Hardox 450



Obrázek 22: Rozmístění poloh pro zkoušky tvrdosti, materiál Hardox 450.



Pozn.: Jednotlivé body odpovídají místům, kde byla provedena zkouška tvrdosti. Tyto polohy jsou zaznamenány i v obrázku 21.

Z hlediska mikrostruktury tvoří po žitání svařence základní materiál sorbitickou strukturu (feriticko-cementitická struktura), která je charakteristická pro žitání při teplotě 400°C. V této oblasti dochází k hrubnutí zrn a poklesu tvrdosti. V tepelně ovlivněné oblasti se nachází směs sorbitu a bainitu. Na rozhraní základního kovu s tepelně ovlivněnou oblastí dochází k rychlejšímu chladnutí, proto je větší koncentrace bainitu právě na tomto rozhraní. Přítomnost bainitické struktury má příznivý vliv na tvrdost, což vyplývá z obrázku 21. Ve svarovém kovu je nakonec přítomen bainit, ferit a malé množství jemného perlitu. Přítomnost feritu a perlitu má významný vliv na pokles tvrdosti svarového kovu.

4.1.3 Využití

Oceli Hardox 450 mají široké využití v konstrukcích, kde je zapotřebí kombinovat odolnost proti abrazivnímu opotřebení s dobrými mechanickými vlastnostmi. Největšího využití a úspěchu ovšem tato ocel sklízí u koreb nákladních aut, protože umožnila využití konstrukce bez výztuh. Mezi další výrobky patří kontejnery, drtiče, stroje na zpracování kovového odpadu, dopravníky, převody, stříhací nože, atd. [12].

4.2 Hardox 500

Plech s označením Hardox 500 disponují vysokou odolností proti arazivnímu opotřebení a nominální tvrdostí 500 HBW. Hlavními výhodami této oceli je kombinace vysoké otěruschopnosti s dobrou ohebností a svařitelností. Tato ocel zvyšuje užitečné vlastnosti konstrukcí s jejich dobrým zpracováním [14].

4.2.1 Vlastnosti a chemické složení

Tvrdost ocelí Hardox 500 se pohybuje v rozmezí 470 až 540 HBW. Její prokalitelnost zaručuje, že minimální tvrdost jádra odpovídá 90 % tvrdosti povrchu. Mez kluzu se pohybuje v hodnotách kolem 1300 MPa, mez pevnosti pak kolem 1550 MPa, hodnota tažnosti je 8 %. Nárazová práce odpovídá při -40°C hodnotě 30 J [12], [14].

Standardní tloušťka plechů z ocelí Hardox 500 je v rozmezí od 4 do 103 mm. Chemické složení jednotlivých tloušťek plechů a uhlíkové ekvivalenty popisuje tabulka 6 [15].

Tabulka 6: Chemické složení a uhlíkový ekvivalent plechu Hardox 500 [15].

Plate thickness mm	C max %	Si max %	Mn max %	P max %	S max %	Cr max %	Ni max %	Mo max %	B max %	CEV typv.	CET tvpv.
4 – 13	0,27	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	0,25	0,25	0,004	0,58	0,40
(13) – 26	0,29	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	0,50	0,30	0,004	0,60	0,42
(26) – 40	0,29	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	1,00	0,60	0,004	0,65	0,43
(40) – 80	0,30	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	0,60	0,004	0,73	0,46

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$
$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

Plate thickness .. tloušťka plechu, CEV, CET .. uhlíkové ekvivalenty.

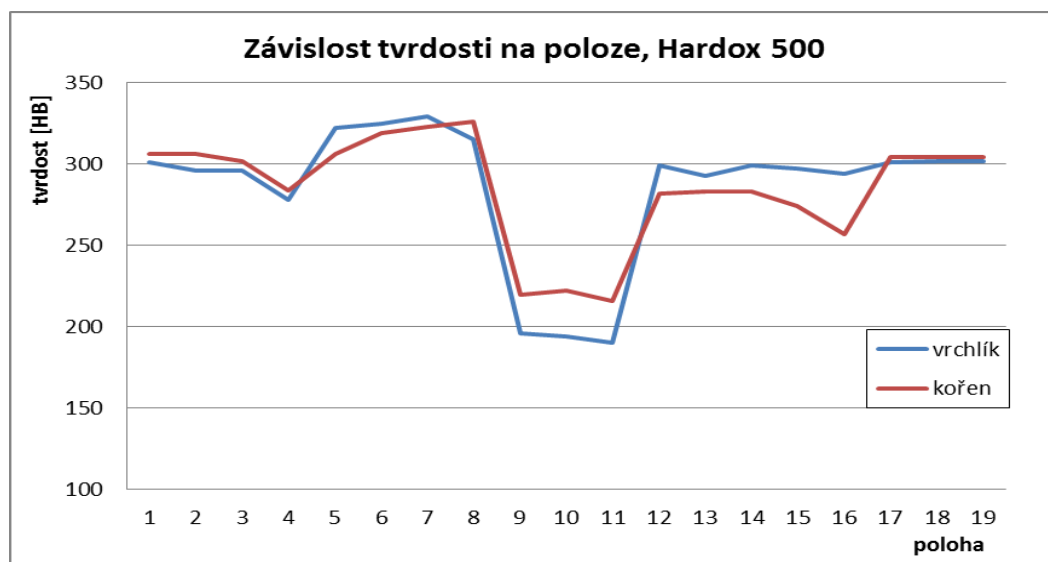
4.2.2 Svařitelnost, možnost tepelného zpracování

Svařitelnost materiálu Hardox 500 je velmi podobná jako u materiálu Hardox 450. Vyznačují se taktéž snadnou svařitelností různými metodami, lze je taktéž svařovat s různými typy materiálů. Od tloušťek plechů překračujících 50 mm je nutný předehřev, z důvodu zachování tvrdosti však nesmí předehřívací teplota přesáhnout hranici 250°C. Při opakovaném nanášení svarové housenky je nutné kontrolovat teplotu materiálu, aby nepřekročila kritickou hodnotu a nedocházelo tak k místnímu poklesu tvrdosti [14].

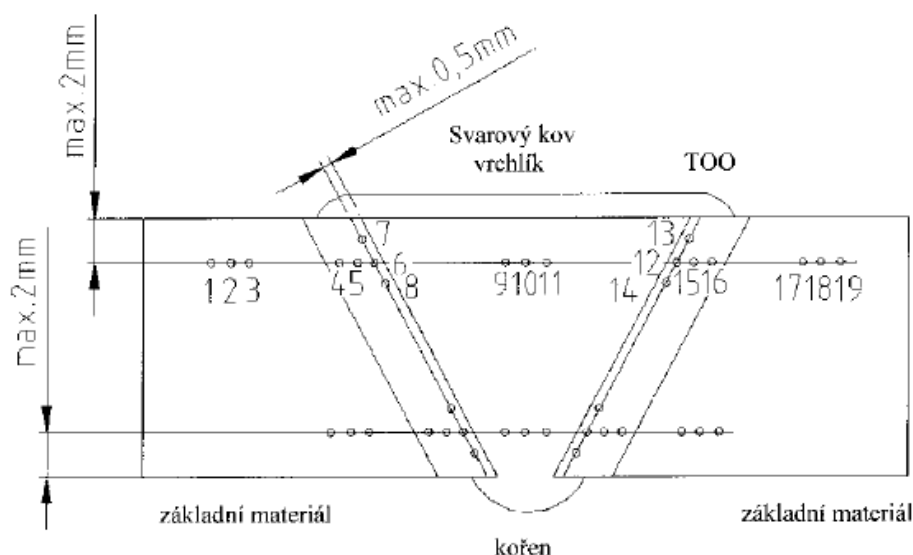
Obloukovým svařováním metodou MAG byl tento materiál snadno svařen s dalšími materiály, a to Hardox 500, Hardox 450, Hardox Hitemp a ocel S355J2. Teplým zpracováním těchto svařenců však došlo opět k významnému poklesu tvrdosti, přibližně na dvě třetiny původní tvrdosti. Na obrázku 23 lze vidět, že v základním materiálu klesla tvrdost na hodnoty kolem 300 HB. Na přechodu základního materiálu s tepelně ovlivněnou oblastí pak tvrdost lehce klesla, blíže ke hranici se svarovým kovem však vykazuje hodnoty kolem 320 HB. Nízké hodnoty uprostřed grafu odpovídají hodnotám tvrdosti svarového kovu.

Mikrostruktura svařované oceli Hardox 500 po žhání obsahuje v základním kovu sorbit s malým množstvím bainitu, což odpovídá lehce zvýšené tvrdosti oproti Hardoxu 450. Vzniklý sorbit je výsledkem žhání za teplot 400°C. V tepelně ovlivněné oblasti opět převládá sorbitická struktura. Svarový kov pak obsahuje bainit, ferit a jemný perlit. Kvůli přítomnosti feritu a perlitu je proto tvrdost nízká.

Obrázek 23: Závislost tvrdosti na poloze, Hardox 500



Obrázek 24: Rozmístění poloh pro zkoušky tvrdosti, materiál Hardox 500.



Pozn.: Jednotlivé body odpovídají místům, kde byla provedena zkouška tvrdosti. Tyto polohy jsou zaznamenány i v obrázku 23.

4.2.3 Využití

Oceli Hardox 500 jsou nejčastěji využívány tam, kde je vyžadována vysoká odolnost proti abrazivnímu opotřebení a tam, kde tvrdost abraziva přesahuje 500 HB. Využívá se na pracovní plochy drtiček, na stroje ke zpracování kovového odpadu, dopravníky, stříhací nože atd. při menších tloušťkách se dá využít současně jako konstrukční a otěruvzdorný materiál [12], [14].

4.3 Creusabro 4800

Ocel Creusabro 4800 se vyznačuje zvýšenou odolností proti opotřebení než běžné do vody kalené oceli. Vzniká kombinací vhodných metalurgických postupů, přičemž využívá různé kombinace legujících prvků (např. chrom, molybden, titan) s řízenou kalicí rychlostí. Oceli Creusabro 4800 tak získávají dobré parametry odolnosti proti opotřebení, tvrdosti a snadnosti následného zpracování [16].

4.3.1 Vlastnosti a chemické složení

Tvrdost oceli Creusabro 4800 je pohybuje v rozmezí od 340 do 400 HB. Výhodou toho je fakt, že ji lze snadno zpracovávat. Chemickým složením a následnými postupy zpracování se následně zlepšuje mikrostruktura oceli, což zvyšuje odolnost proti opotřebení. Mez kluzu odpovídá hodnotám kolem 900 MPa, mez pevnosti pak 1200 MPa, hodnota tažnosti je 12 %. Při -20°C je nárazová práce rovna hodnotě 45 J [17].

Tabulka 7: Chemické složení oceli Creusabro 4800 [17].

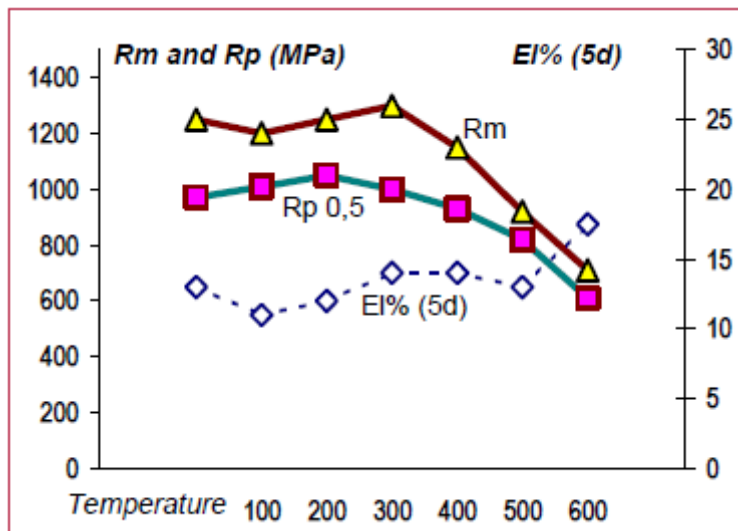
Guaranteed values (Weight %)

C	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti
≤ 0.20	≤ 0,005	≤ 0,018	≤ 1,60	≈ 0,20	≤ 1.90	≤ 0,40	≤ 0,200

Guaranteed values (Weight %) .. Garantované hodnoty (hm. %)

Obrázek 25 popisuje závislost mechanických vlastností na teplotě okolí. Z grafu je zřejmé, že do teploty kolem 300°C se mez kluzu a mez pevnosti výrazně nemění.

Obrázek 25: Závislost mechanických vlastností při vyšších teplotách [17].



Rm .. mez pevnosti, Rp .. mez kluzu, EI .. tažnost, Temperature .. teplota

4.3.2 Svařitelnost, možnost tepelného zpracování

Při svařování plechů typu Creusabro 4800 je třeba, aby okolní teplota byla vyšší než 10°C. Při nižších teplotách dochází ke kondenzaci vlhkosti a do svaru se dostává vodík, který nepříznivě ovlivňuje jeho kvalitu. Při ručním svařování obalovanou elektrodou je nutný předehřev plechů už od tloušťky 50 mm, při svařování pod tavidlem od 60 mm a při poloautomatickém svařování plynem stačí předehřívát plechy až od tloušťek 70 mm. Tyto svary mají však obecně daleko nižší otěruvzdornost než samotný svařovaný materiál. Tento problém lze řešit několika způsoby. Prvním řešením je použití takového přídavného materiálu, který vytvoří tvrdé, otěruvzdorné, krycí vrstvy. Jeho nevýhodou je však vyšší náchylnost ke vzniku trhlin, než u samotného otěruvzdorného plechu. Typickým příkladem takových přídavných materiálů je Carbofil A-500 (plný drát) nebo Fluxofil 54 (plněný drát). Dalším způsobem je takové konstrukční řešení, které zamezuje styku svaru s abrazivním prostředím [18].

Tepelné zpracování oceli Creusabro 4800 výrobce nedoporučuje. Do praktických zkoušek nebyla tato ocel zahrnuta. Obecně však lze předpokládat, že po žhání ke snížení pnutí dojde k poklesu tvrdosti zhruba o jednu třetinu až jednu polovinu v základním materiálu, tvrdost svarového kovu bude záviset na volbě přídavného materiálu [17].

4.3.3 Využití

Ideální využití této oceli je v lomech a dolech, cementářském a ocelářském průmyslu, na součásti zemědělských strojů a strojů pracujících se zeminou. Uplatnění nalézá v místech, kde dochází ke všem typům opotřebení nebo dopadu, v suchých i vlhkých médiích. Nejvýznamnější výhodou je však fakt, že je vhodná i do prostředí s teplotou do 350°C [16], [17].

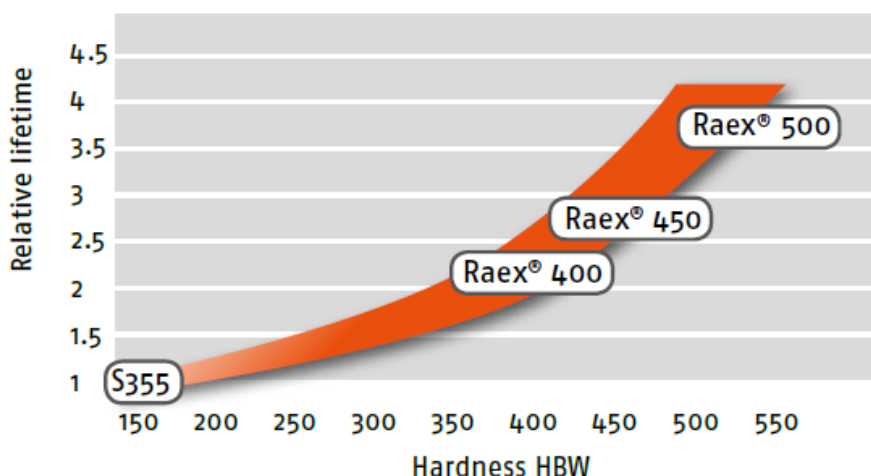
4.4 Ruukki Raex

Oceli s označením Raex jsou oceli s vysokou pevností a vynikající vysokou odolností proti opotřebení a povrchovým tlakům. Tyto charakteristiky jsou zaručeny vhodným legováním a následným tepelným zpracováním s technologií přímého kalení. I když tyto oceli disponují vysokými hodnotami tvrdosti a pevnosti, lze je snadno svařovat i tvářet [19], [20].

4.4.1 Vlastnosti a chemické složení

Obrázek 26 popisuje relativní životnost a tvrdost jednotlivých ocelí Raex. Relativní životnost je hodnota vytvořená jako násobek životnosti běžné konstrukční oceli S355. Číselné označení oceli Raex udává její průměrnou tvrdost v HBW [21].

Obrázek 26: Závislost tvrdosti a životnosti ocelí Ruukki [21].



Relative lifetime .. relativní životnost, Hardness HBW .. tvrdost v jednotkách HBW.

Plech z těchto ocelí se vyrábí v tloušťkách od 2 do 80 mm. Tvrdost plechu Raex 500 se pohybuje v hodnotách od 450 do 540 HBW, mez kluzu od 1300 do 1400 MPa, mez pevnosti od 1600 do 1650 MPa a tažnost odpovídá 8 %. Tyto hodnoty jsou závislé na tloušťce plechu. Pro Raex 400 platí hodnoty tvrdosti od 360 do 440 HBW, mez kluzu 1100 MPa, mez pevnosti 1300 MPa a tažnost 10 % [19].

Tabulka 8 popisuje chemické složení jednotlivých tloušťek plechů Raex 500.

Tabulka 8: Chemické složení oceli Raex 500 [21].

Product	C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr (max %)	Ni (max %)	Mo (max %)	B (max %)
Plate	0.30	0.80	1.70	0.025	0.015	1.50	1.00	0.50	0.005
Sheet	0.27	0.50	1.60	0.025	0.010	1.20	1.00	0.25	0.005

Product .. produkt, plate .. deska, sheet .. plech.

Tabulka 9 zobrazuje hodnoty uhlíkových ekvivalentů v závislosti na tloušťce plechu. Zde platí, že čím je tloušťka větší, tím větší je uhlíkový ekvivalent.

Tabulka 9: Uhlíkový ekvivalent oceli Raex 500 [21].

Thickness (mm)	Sheet 2.50 - 7.00	Plate 6.00 - 20.00	Plate 20.01 - 32.00	Plate 32.01 - 52.00	Plate 52.01 - 80.00
Typ CET(CEV) ^{1) 2)}	0.40 (0.55)	0.40 (0.51)	0.41 (0.59)	0.43 (0.65)	0.43 (0.68)

Thickness .. tloušťka, sheet .. plech, plate .. deska, CET, CEV .. uhlíkové ekvivalenty.

4.4.2 Svařitelnost, možnost tepelného zpracování

Oceli Ruukki Raex patří mezi dobře svařitelné materiály. Kvalita svaru závisí na mnoha faktorech, a to zejména na čistotě prostředí (atmosferické podmínky, čistota svarových ploch) a předehřevu materiálu. Teplota předehřevu se volí podle tloušťky materiálu. Tyto parametry popisuje následující tabulka [20], [21].

Tabulka 10: Závislost teploty předehřevu na tloušťce materiálu [21].

Ruukki Raex	Plate thickness, mm															
	10		20		30		40		50		60		70		80	
Raex 400	+20				+75		+100		+125		+150		+175			
Raex 450	+20		+75		+100		+125		+150		+175				+200	
Raex 500	+20		+100		+125		+150		+175				+200			

Plate thickness .. tloušťka plechu

Výrobci nedoporučují tepelné zpracování ocelí Ruukki Raex, jelikož dochází k výraznému poklesu tvrdosti. Vnitřní pnutí se zde částečně odstraňuje předehřevem svařovaného materiálu, pokud však je tepelné zpracování nutné, musí se počítat s výrazným poklesem tvrdosti základního materiálu. Při zkouškách tvrdosti nebyl materiál Ruukki Raex použit [19].

4.4.3 Využití

Oceli Raex se používají jako konstrukční materiál pro dopravníky, na výrobu strojů určených k těžbě, nakládání, přepravě a drcení rud, jako jsou rypadla, čelní nakladače, vyklápecí korby, drticí zařízení, sila nebo násypky. Tyto oceli umožňují výrobu inovativních a lehkých konstrukcí [19], [20].

5. Závěr

Svařování jako takové je velice rozvinutou metodou, při které vznikají nerozebíratelné spoje. Mezi hlavní výhody patří úspora materiálu v podobě menších přídavek na obrábění než u odlitků, vysoká pevnost svarového spoje, těsnost, trvanlivost, úspora materiálu a možnost svařování dvou odlišných materiálů do jednoho celku. Ač je výběr technologie svařování velice obsáhlý, je velká škoda, že mnoho firem využívá pouze malý zlomek těchto technologií ve své výrobě. Stojí za zvážení, zda by pro různé typy materiálů nebyly vhodnější jiné metody, jak z hlediska úspory času, tak kvality svarového spoje.

Tepelné zpracování je v dnešní době významnou a nutnou technologií, která je používána při výrobě velkého množství součástí. Při těchto metodách dochází buď k zušlechťování materiálu, nebo ke zlepšení obrobitelnosti. Po tepelném zpracování materiál získává lepší mechanické vlastnosti v celém svém objemu (houževnatost, pevnost, atd.) nebo lepší vlastnosti na svém povrchu (tvrdost, otěruvzdornost). Podle požadovaných vlastností proto volíme ideální teploty a časy tepelného zpracování.

Otěruvzdorné plechy hrají významnou roli v dopravním a těžebním průmyslu, kde jsou kladeny vysoké nároky na odolnost materiálu vůči abrazi. Svařence z nich se zde používají jako korby aut, lžíce nakladačů, násypky, sila, pracovní plochy drtiček apod., svůj význam mají také jako funkční plochy strojů zpracovávající kovový odpad. Jistým problémem je vznik vnitřního pnutí při svařování těchto materiálů. Částečně se dá vnitřní pnutí odstranit vhodnou volbou teploty předehřevu, nebo následným tepelným zpracováním, či mechanicky (vibrováním). Tepelné zpracování však není nejvhodnější volbou, protože dochází ke změně struktury materiálu a následnému výraznému poklesu tvrdosti a tím pádem i otěruvzdornosti. Je tedy třeba zvážit, bude-li pro následnou funkci součásti z těchto materiálů vhodnější nižší otěruvzdornost za cenu odstranění vnitřního pnutí, nebo zachování otěruvzdornosti s částečným vnitřním pnutím v místě svaru.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KUBÍČEK, J. *TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ* [online]. ÚST, odbor svařování a PÚ, s. 2 [cit. 2017-2-2]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf
- [2] KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*, 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, s. 19. ISBN 80-85771-81-0
- [3] BENEŠ, Libor. *Přehled svařování* [online]. 2013, s. 15 [cit. 2017-2-2]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
- [4] KUBÍČEK, Jaroslav. *TECHNOLOGIE II, ČÁST SVAŘOVÁNÍ, ZÁKLADNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2006, [cit. 2017-2-2]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>
- [5] HAVELKA, Pavel. O svařování. *Automig.cz* [online]. [cit. 2017-2-5]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/>
- [6] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [7] HAMERNÍK, Jan. *Jhamernik.sweb.cz* [online]. 2005 [cit. 2017-2-19]. Základy tepelného zpracování kovů. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
- [8] MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. *Tepelné úpravy kovových materiálů*. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-01-01002-3.
- [9] AUTOR NEZNÁMÝ. *ELUC* [online]. [cit. 2017-3-2]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/9040/obr_3_Pas_prokalitelnosti.jpg
- [10] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8
- [11] SSAB. *Materiálové listy Hardox 450*. [online]. 2016-11-3, [cit. 2017-3-5]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/brands/hardox/products/hardox-450>
- [12] MIKA, Ivan. *Hardox – otěruvzdorný plech. STAVEBNÍ TECHNIKA*. [online]. 2009-4-9, [cit. 2017-3-15]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/hardox-oteruvzdorny-plech>
- [13] SSAB. *Materiálové listy Hardox 450*, 2007-4-2, s. 1.
- [14] SSAB. *Materiálové listy Hardox 500*. [online]. 2016-11-3, [cit. 2017-3-7]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/brands/hardox/products/hardox-500>
- [15] SSAB. *Materiálové listy Hardox 500*, 1999-10-1, s. 1.
- [16] CZWELDING. *Creusabro 4800*. [online]. [cit. 2017-3-20]. Dostupné z: <http://www.czwelding.cz/data/creusabro4800.pdf>
- [17] INDUSTEEL CREUSOT. *Creusabro 4800*. 2003.

- [18] LEGA-INOX. *Technologické podmínky zpracování CR 4800*.
- [19] SSAB. *Materiálové listy Ruukki Raex*. [online]. 2017-2-28, [cit. 2017-3-29]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/steel-categories/wear-resistant-steels/products/raex>
- [20] BRTNÍK, Tomáš. Otěruvzdorná ocel Ruukki Raex vhodná pro nejnáročnější aplikace. *STAVEBNÍ TECHNIKA*. [online]. 2014-7-23 [cit. 2017-3-27]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/oteruvzdorna-ocel-ruukki-raex-vhodna-pro-nejnarocnejsi-aplikace>
- [21] RUUKKI. *WELDING AND THERMAL CUTTING OF RAEX WEAR-RESISTANT STEELS*. Helsinki. 2013.